

SISTEMA DE MEDICIÓN DE LAS FUERZAS DE LA INTERACCIÓN RUEDA –  
RIEL EN UN SISTEMA FERROVIARIO – (ESFORCE)

JUAN FRANCISCO BOTERO ESCOBAR

UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA  
AREA DE MANTENIMIENTO  
MEDELLIN  
2007

SISTEMA DE MEDICIÓN DE LAS FUERZAS DE LA INTERACCIÓN RUEDA –  
RIEL EN UN SISTEMA FERROVIARIO – (ESFORCE)

JUAN FRANCISCO BOTERO ESCOBAR

Monografía para optar al título de Especialista en Mantenimiento Industrial

Asesor:

MS.Sc. Leonel Francisco Castañeda Heredia

UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA  
AREA DE MANTENIMIENTO  
MEDELLIN  
2007

## CONTENIDO

Pág.

1. OBJETIVO GENERAL .....	9
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
3. INTRODUCCIÓN .....	10
4. MÉTODO DE MEDICIÓN .....	11
5. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE .....	14
6. INSTRUMENTACION UTILIZADA.....	18
7. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE .....	20
8. CALIBRACION DEL SISTEMA DE MEDICIÓN .....	25
9. DESCRIPCION DE LA CALIBRACION .....	25
10. RECOLECCION Y ANALISIS DE DATOS .....	26
11. MEDICIONES .....	29
12. CONCLUSIONES .....	30

13. BIBLIOGRAFIA .....	33
14. ANEXOS .....	34

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Ilustración 1. Método de medición. ....	12
Ilustración 2. Distribución de los strain gages en la vía. ....	14
Ilustración 3. Ubicación de los strain gages en el riel. ....	15
Ilustración 4. Preparación de la superficie del riel.....	15
Ilustración 5. Diagrama de conexión para la medición de las fuerzas verticales Q. .....	16
Ilustración 6. Diagrama de conexión para la medición de las fuerzas laterales Y. ....	16
Ilustración 7. Diagrama de conexión para la medición de esfuerzos del riel.....	17
Ilustración 8. Sistema de adquisición.....	18
Ilustración 9. Diagrama de flujo del software. ....	21
Ilustración 10. Configuración de los canales de adquisición.....	22
Ilustración 11. Panel frontal del programa de adquisición.....	24
Ilustración 12. Pasos para la calibración del equipo. ....	25
Ilustración 13. Montaje para la calibración.....	26

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Resultados de la serie de cargas para la calibración del sistema de medición. ....	27
Tabla 2. Resumen de las mediciones. ....	29
Tabla 3: Comparación entre los datos prácticos y los datos teóricos. ....	30

## LISTA DE GRAFICAS

Pág.

Gráfica 1. Regresión lineal de los datos obtenidos en la calibración. ....	28
--	----

## LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO 1: Mediciones de fuerzas y esfuerzos en la vía.....	34
ANEXOS 2: Graficas de posibles defectos en las ruedas.....	49
ANEXOS 3: Artículo para publicación internacional.....	54



## 1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las fuerzas y los esfuerzos de la flota de los trenes del Metro de Medellín en un tramo recto instrumentado de la vía comercial.

## 2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar la bibliografía relacionada con la medición y evaluar los esfuerzos y las fuerzas en la interacción de la rueda – riel en sistemas ferroviarios.
- Desarrollar e implementar un sistema de medición de estas fuerzas denominado – ESFORCE.
- Medir las fuerzas y esfuerzos de la interacción rueda-riel en 18 vehículos de pasajeros utilizando el sistema ESFORCE.
- Evaluar los resultados obtenidos.

### 3. INTRODUCCIÓN

Esta medición se basa en los parámetros definidos en la norma internacional UIC 518 de la Unión Internacional de Vías Férreas, la cual busca establecer las reglas para llevar a cabo pruebas de comportamiento dinámico, relacionadas con la seguridad, fatiga de la vía, comportamiento de la marcha y el análisis de resultados, para propósitos de aprobación de material rodante. En esta, la aprobación de un vehículo ferroviario desde el punto de vista del comportamiento dinámico debe estar basada en una línea de prueba (no en una simulación) usando los métodos medición normal o simplificado, en donde en el método normal se miden las fuerzas de interacción rueda-riel Y y Q y se calcula la relación Y/Q.

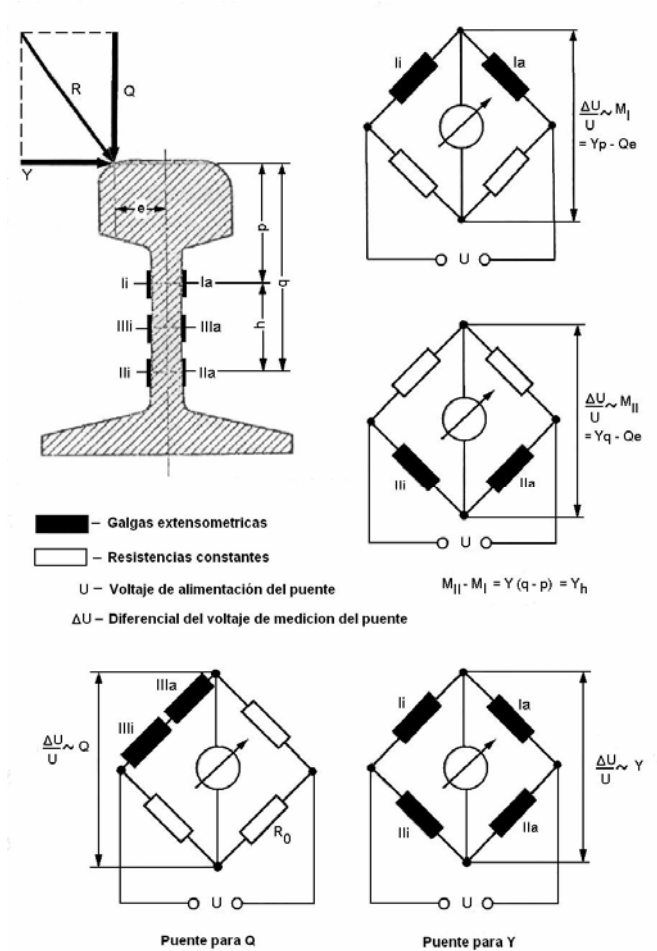
La interacción eficiente entre el vehículo y la vía puede soportar pesos por eje muy altos, por lo que un inapropiado diseño y mantenimiento de la interfase vía – vehículo, puede conllevar a una rápida degradación de los componentes del sistema y poner en riesgo el carácter lucrativo de la operación ferroviaria en cuestión. Debido a esto, es importante definir los diferentes tipos de fuerzas que intervienen en el sistema rueda riel, incluyendo las fuerzas verticales, que son un factor determinante en la predicción de los desgastes y deformaciones de los diferentes elementos del vehículo y la vía y en la determinación de factores como la velocidad de operación de los vehículos y su carga máxima, entre otros.

#### 4. MÉTODO DE MEDICIÓN

Para la medición de las fuerzas se utiliza un método suizo de medición denominado “riel de medición SBB”, el cual permite medir las fuerzas  $Y$  y  $Q$  de manera independiente mediante la utilización de strain gages pegados en el riel entre dos durmientes y con conexiones específicas de puente de Wheatston.

Según este método, la forma de medición para encontrar el recorrido (trayectoria) de la fuerza  $Y$  (ilustración 1) consiste en medir dos momentos  $M_I$  y  $M_{II}$  en los lugares I y II (la ley de dos momentos). Se puede medir en este ultimo la diferencia de voltaje  $\Delta U$ , la cual es proporcional a la fuerza guía  $Y$  buscada y es independiente del valor y punto de aplicación de la fuerza vertical  $Q$ .

Ilustración 1. Método de medición.



Para la medición de la fuerza vertical  $Q$  de la rueda, se utilizan strain gages pegados en los lugares III en el alma (centro) del riel (ilustración 1); el cual se conoce como el eje neutro, en donde la fuerza  $Y$  y la aplicación excéntricamente de la fuerza  $Q$  producen el mínimo ruido que pueda influenciar la precisión de la medición. El puente de medición reacciona entonces en este caso a los esfuerzos de compresión en el cuello del riel, que provienen de la fuerza  $Q$ , y en este mismo se mide entonces la fuerza vertical  $Q$  independiente de la fuerza de guía  $Y$ .

La medición de los esfuerzos en el riel que provienen de la interacción de los vehículos ferroviarios con la vía se llevan a cabo en tramos rectos que se deben

de caracterizar por su buen estado y por lo general en 2 curvas de radios  $r$ : 800 m y  $r$ : 350 m. En el área experimental del tramo de la vía se distribuyen los strain gages que son pegados en un solo lado de la vía (indiferente cual), debido a:

- La alta probabilidad de registrar en una sección de riel de medición seleccionada, la máxima interacción lateral entre la vía y la rueda del vehículo ferroviario, causada por el serpenteo en las rectas.
- Obtención de unos datos promedios que correspondan a una longitud definida del riel.

Los esfuerzos en cada sección son medidos con dos strain gages ubicados simétricamente con respecto al eje vertical del riel (cerca del borde del pie). Cada una de las secciones de medición se encuentra en la mitad entre dos durmientes consecutivos. Los strain gages son pegados en el pie del riel en dirección paralela al eje longitudinal del mismo.

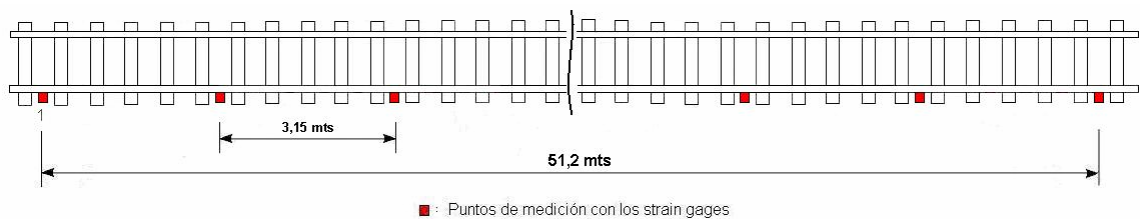
Los esfuerzos medidos en cada sección del riel constituyen un resultado sumatorio de la interacción rueda riel – fuerza vertical  $Q$  y fuerza lateral  $Y$  -, y que son aplicadas al riel excéntricamente.

Naturalmente, antes de realizar las correspondientes mediciones de los esfuerzos y las fuerzas  $Y$  y  $Q$ , que provienen de la influencia de la rodadura del vehículo por el riel, el riel de medición debe estar muy bien calibrado para obtener la relación entre la medición directa de las deformaciones y fuerzas  $Y$  y  $Q$  que se buscan. La precisión de este método de medición es equivalente a  $\pm 7\%$ .

## 5. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

La instrumentación se realizó en un tramo de vía entre las estaciones Bello y Madera en el sentido sur-norte. La ilustración 2 muestra la distribución de los puntos de medición en el tramo de la vía seleccionado, en la que se tiene instalado un punto de medición cada 3,15mts aproximadamente a lo largo de un lado de la vía hasta completar 16 puntos de medición, para un total de 51,2mts de vía instrumentados.

Ilustración 2. Distribución de los strain gages en la vía.



Se instalan ocho strain gages en cada punto de medición (ilustración 3), seis de las cuales son strain gages uniaxiales ubicadas en el alma del riel (puntos 1, 2 y 3) y dos son rosetas a 90 grados instaladas en el pie del riel (puntos 4a y 4b), para un total de 128 strain gages en los 16 puntos de medición.

Ilustración 3. Ubicación de los strain gages en el riel.

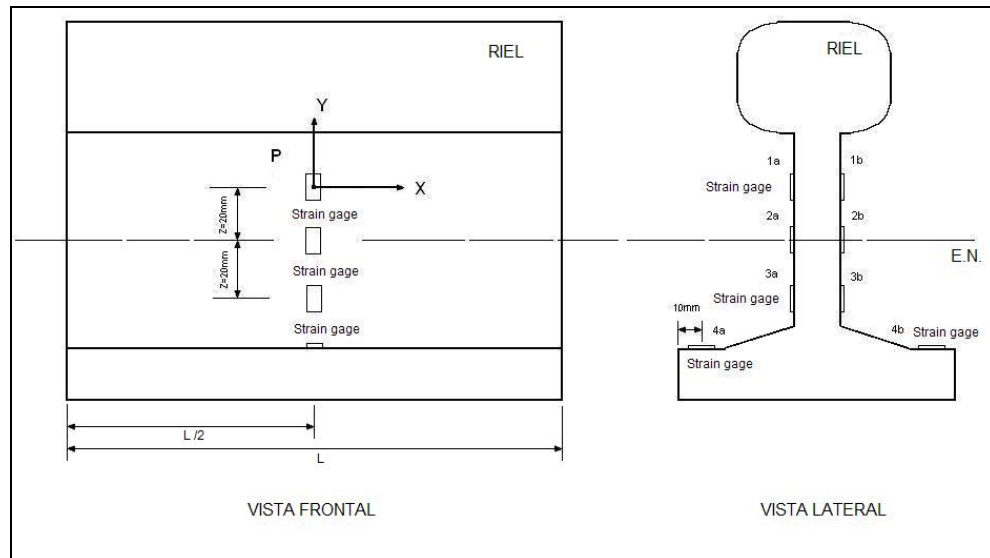
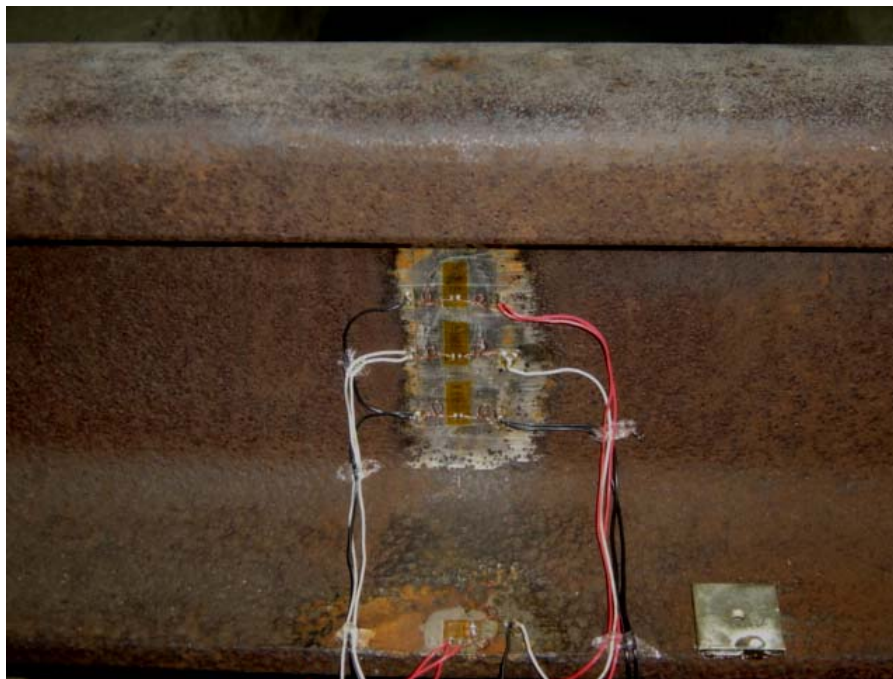


Ilustración 4. Preparación de la superficie del riel.



Según la teoría utilizada para el riel de medición SBB, las conexiones y los tipos de puentes a utilizar, van a depender de la fuerza que se pretenda medir. Con el

propósito de disminuir los requerimientos de cable se deben hacer la mayor cantidad posible de conexiones en el punto. Para las mediciones de las fuerzas verticales, laterales y los esfuerzos, las conexiones se deben hacer tal como se indica en las ilustraciones 5, 6 y 7 respectivamente.

Ilustración 5. Diagrama de conexión para la medición de las fuerzas verticales Q.

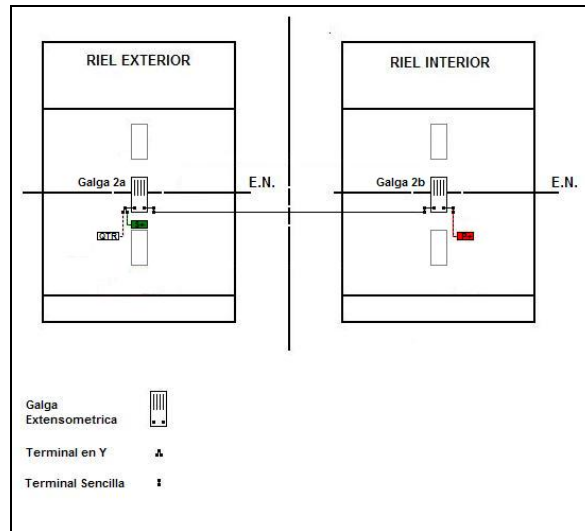


Ilustración 6. Diagrama de conexión para la medición de las fuerzas laterales Y.

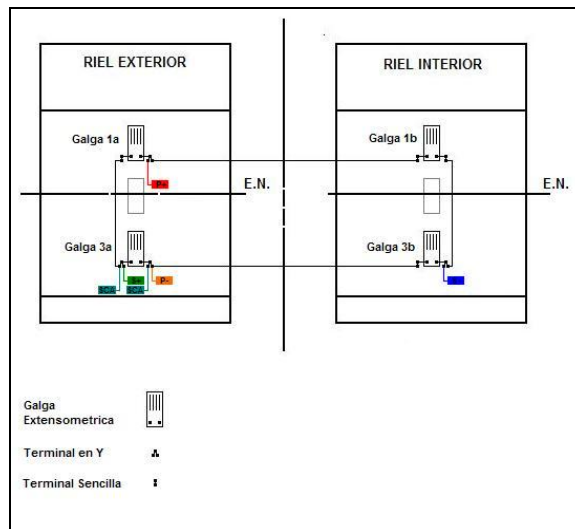
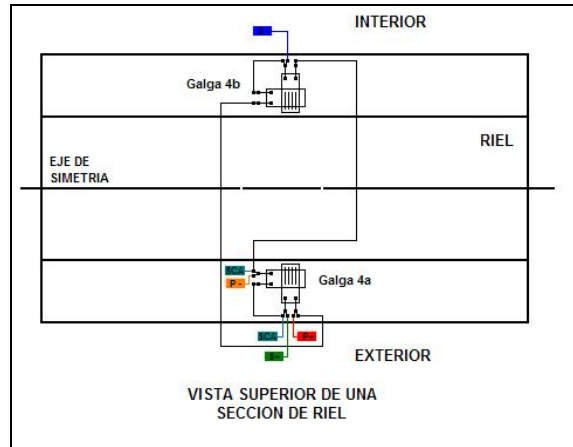




Ilustración 7. Diagrama de conexión para la medición de esfuerzos del riel.

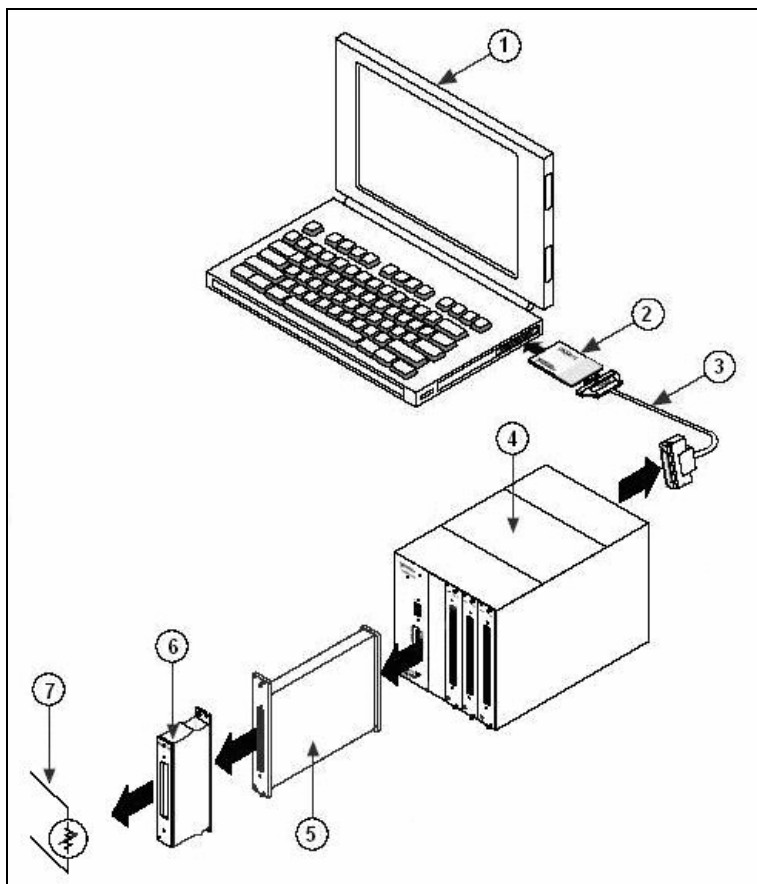


Una vez realizadas las conexiones de las galgas extensométricas, se aplica una capa delgada de silicona sobre estas hasta cubrirlas totalmente (se recomienda para esto la loctite 5699 Grey, la cual es aislante eléctrica, resiste temperaturas entre -59°C hasta 329 °C y es especial para sensores, pues no genera productos corrosivos durante el curado). Luego se cubre la silicona con el protector de aluminio ABM75 para darle una mayor protección a las galgas extensométricas contra la humedad, además de protegerlas contra posibles golpes.

## 6. INSTRUMENTACION UTILIZADA

Para la adquisición y el acondicionamiento de la señal se utiliza un sistema similar al que aparece en la ilustración 2, el cual consta básicamente de un equipo acondicionador de señal, una tarjeta de adquisición de datos y un computador personal

Ilustración 8. Sistema de adquisición.



1. Computador portátil.

2. NI DAQCard 6062E.

3. Cable blindado SCXI-1349.
4. Chasis SCXI-1000.
5. Módulo SCXI-1520.
6. Bloque de borneras SCXI-1314.
7. Transductor (galgas extensométricas).

Este sistema de adquisición posee un chasis el cual provee un ambiente de bajo ruido para el acondicionamiento de señales, el suministro de energía y el control de los circuitos de los puntos de medición.

También se cuenta con cuatro módulos universales para galgas extensométricas de ocho canales cada uno, con el que se miden las señales. Estos módulos permiten realizar la amplificación y el filtrado independiente para cada canal y poseen una fuente de excitación programable para suministrar voltajes independientes de entre 0 y 10 voltios.

Un bloque de borneras que se ensambla en el modulo para strain gages permite realizar la conexión de cada uno de los puentes. Este bloque tiene la opción para instalar resistencias que sirven para completar un circuito de cuarto de puente. Además, tiene instaladas dos resistencias de 100 ohms por canal, para realizar calibración de *shunt*.

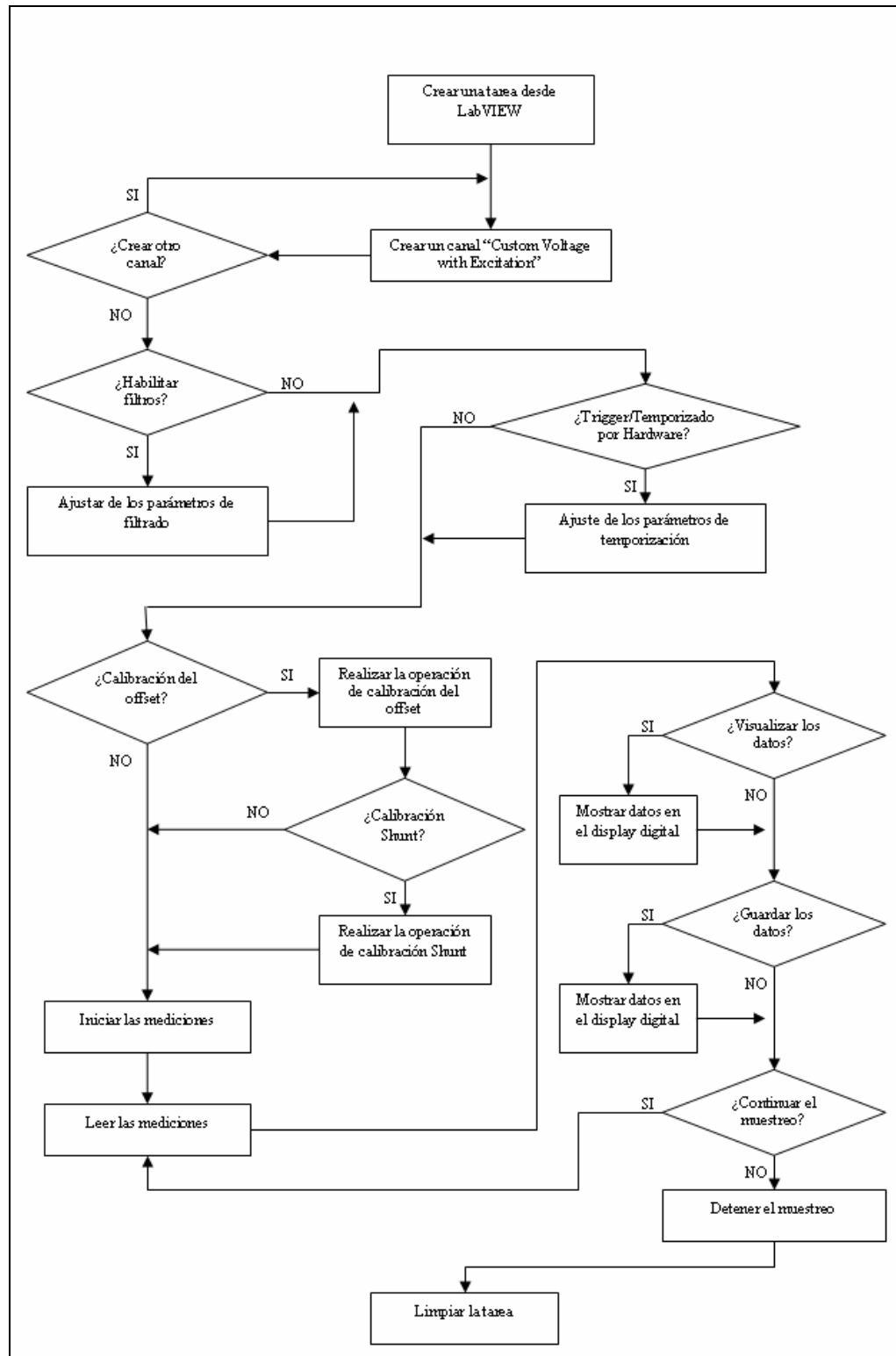
La adquisición se realiza con una tarjeta de adquisición de National Instruments, la DAQCard 6062E para puerto PCMCIA, que permite velocidades de adquisición de hasta 500 kS/s y una resolución de 12 bits.

## 7. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Las tarjetas serán controladas utilizando un software desarrollado en LabVIEW, el cual se encargara de recibir y procesar los datos de las galgas extensométricas a una velocidad de muestreo de 1200Hz, con lo que con un vehiculo circulando a 80 Km/h se tomarían muestras cada 18mm aproximadamente. Los datos obtenidos por cada punto de medición serán procesados estadísticamente para cada una de las ruedas.

La siguiente ilustración muestra el diagrama de flujo del programa, en donde se observan los pasos necesarios para adquirir, presentar y almacenar los datos de la medición.

Ilustración 9. Diagrama de flujo del software.



Se debe realizar la configuración necesaria de los parámetros dependiendo de los puentes que se vayan a utilizar para las mediciones. Se debe tener en cuenta que se van a instalar 48 puentes en el tramo de riel seleccionado, distribuidos de la siguiente manera:

- 16 puentes para medir cargas verticales (Q).
- 16 puentes para medir cargas laterales (Y).
- 16 puentes para medir los esfuerzos en el pie del riel ( $\sigma$ ).

Como el equipo cuenta únicamente con 32 canales, solo se pueden medir dos tipos de puentes por vez, por lo que es necesario configurar el software de acuerdo a los puentes que se deseen medir.

Ilustración 10. Configuración de los canales de adquisición.

Config. Canal1   Config. Canal2   Config. Canal3

**Parametros de la adquisición**

Canal Físico 1  
I

Valor Minimo  
-0.50

Valor Maximo  
0.50

Habilitar Canal2

**Parametros del puente de Wheatstone**

Configuración del Puente 1  
Quarter Bridge

Fuente de la Excitación 1  
Internal

Valor de la Excitación 1 (V)  
6.875

Resistencia nominal de la Galga (Ohms)  
120

Los valores que se deben de seleccionar para cada tipo de puente son los siguientes:

*Puente para la fuerza vertical (Q):*

- Canal físico: se seleccionan los canales que se utilizan para la adquisición de las señales provenientes de este puente.
- Valores máximo y mínimo: Es el rango de voltaje que va a leer la tarjeta para este puente. Se configura en +/- 0.5.
- Configuración del puente: quarter bridge.
- Fuente de la excitación: interna.
- Valor de la excitación: 10 V.
- Resistencia nominal de la galga: 1000 ohmnios.

*Puente para la fuerza lateral (Y):*

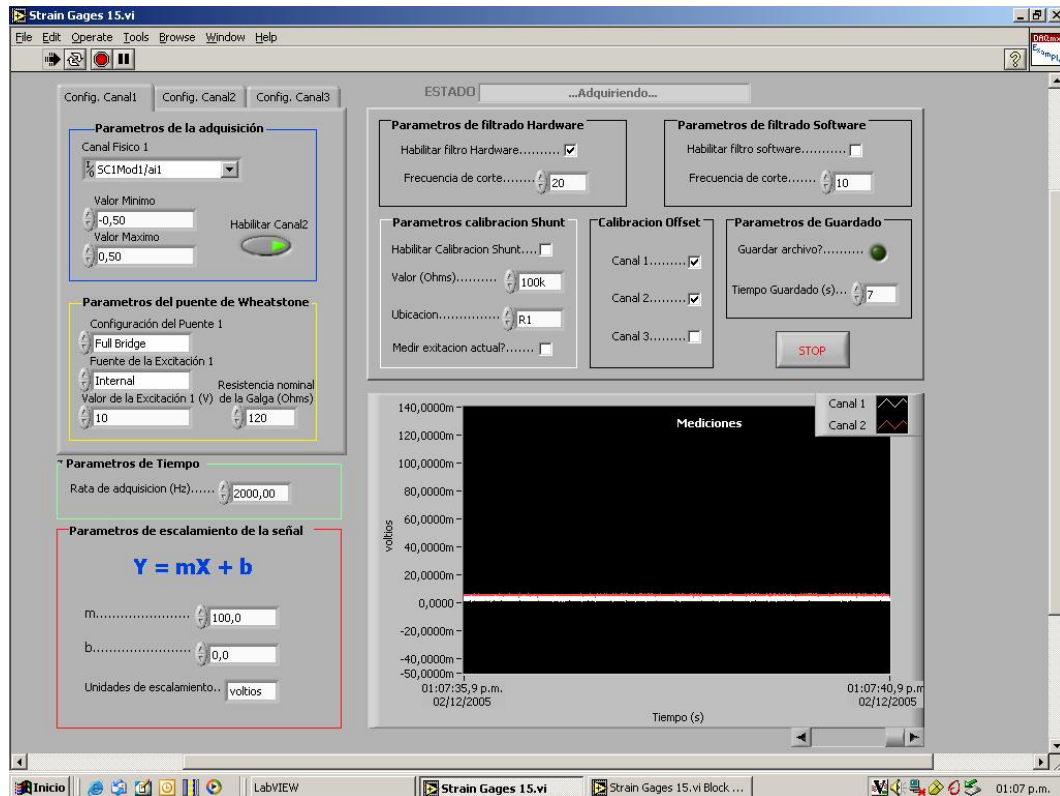
- Canal físico: se seleccionan los canales que se utilizan para la adquisición de las señales provenientes de este puente.
- Valores máximo y mínimo: +/- 0.5.
- Configuración del puente: Full bridge.
- Fuente de la excitación: interna.
- Valor de la excitación: 10 V.
- Resistencia nominal de la galga: 350 ohmnios.

*Puente para los esfuerzos ( $\sigma$ ):*

- Canal físico: se seleccionan los canales que se utilizan para la adquisición de las señales provenientes de este puente.
- Valores máximo y mínimo: +/- 0.5.
- Configuración del puente: Full bridge.
- Fuente de la excitación: interna.
- Valor de la excitación: 10 V.
- Resistencia nominal de la galga: 350 ohmnios.

Los demás datos del software que se pueden configurar ya se encuentran preestablecidos y se deben dejar con los valores con los que inicia el programa para evitar posible errores. El software captura los datos a una frecuencia de 1200Hz y les aplica un filtro paso bajo a 20Hz.

Ilustración 11. Panel frontal del programa de adquisición.



Los datos obtenidos se almacenan en un archivo de Excel para su posterior análisis. En este punto se puede aplicar un filtrado por software, se obtienen los valores máximos y se separan los datos según la rueda a la que pertenezcan.



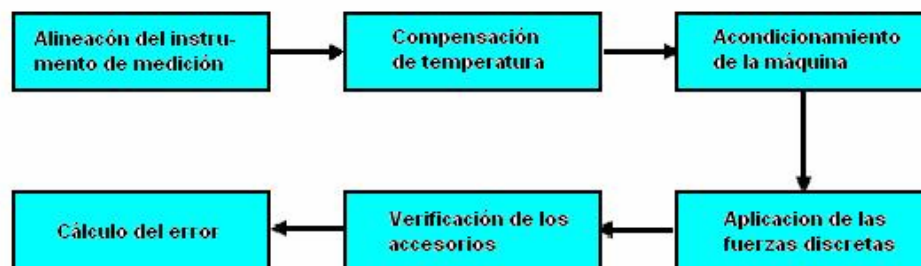
## 8. CALIBRACION DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

La calibración del sistema de medición exige la correlación entre los valores del parámetro físico a medir (fuerza) y los registros del transductor (Voltaje de salida). La calibración puede ser directa, teórica o simulada; en este caso se utilizó la calibración directa, en la cual se aplican cargas conocidas al sistema y se almacenan los datos de voltaje obtenidos.

## 9. DESCRIPCION DE LA CALIBRACION

La calibración se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma técnica colombiana NTC 3761. El ensayo se realizó a una temperatura de 24°C y una humedad relativa del 50%.

Ilustración 12. Pasos para la calibración del equipo.



Se utilizó un banco de pruebas con un gato hidráulico de 40 toneladas, ubicado en los talleres del Metro de Medellín. Fue necesario, además, realizar un montaje que

reprodujera un tramo de la vía con dos rieles montados sobre cuatro durmientes, los cuales guardaban las distancias reales de la vía (ver ilustración 14).

Ilustración 13. Montaje para la calibración.



Las galgas fueron pegadas siguiendo los mismos procedimientos utilizados para pegar las galgas en la vía de prueba y guardando las mismas distancias. Se debe anotar que para esta calibración solo se aplicaron cargas verticales debido a que aun no se cuenta con el equipo adecuado para aplicar las cargas horizontales.

## 10. RECOLECCION Y ANALISIS DE DATOS

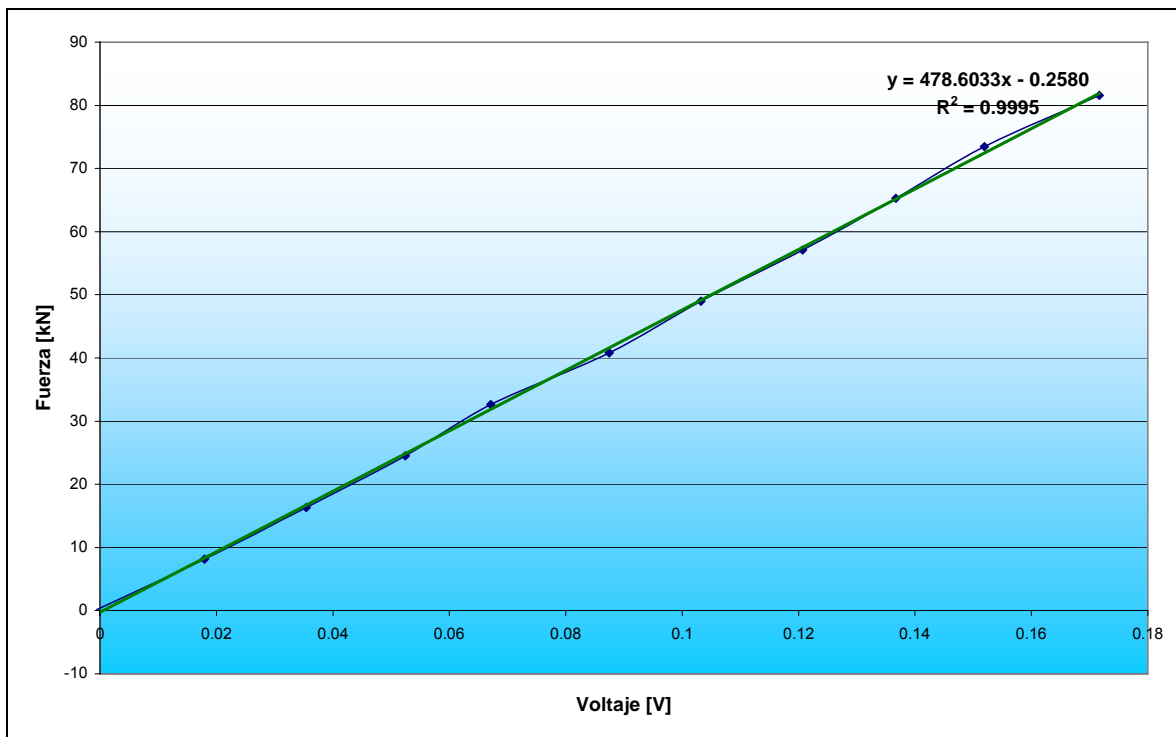
Se realizaron tres series de aplicación de carga, donde, en cada una, se aplicaron cargas discretas igualmente espaciadas. Se aplicaron cargas desde 0 hasta 81.3kN, con incrementos de 8.13kN, y se registró el valor asociado al voltaje que aparecía en el sistema de adquisición de datos (Ver tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la serie de cargas para la calibración del sistema de medición.

Fuerza (kN)	Serie 1 (V)	Serie 2 (V)	Serie 3 (V)
0	-0.00062316	-0.00082977	-0.00109518
8.16	0.01862558	0.01711086	0.01819151
16.32	0.03595966	0.03583153	0.03453041
24.48	0.05162812	0.05439802	0.05120473
32.64	0.06485449	0.06861687	0.06781615
40.8	0.08846483	0.08514966	0.08876424
48.96	0.10025831	0.10774536	0.10158466
57.12	0.12067362	0.11960076	0.12183918
65.28	0.13583788	0.13804059	0.13613693
73.44	0.15365627	0.14794928	0.15403855
81.6	0.16818799	0.17329924	0.17352852

Posteriormente se realizó una regresión lineal en Excel, a los datos obtenidos en la calibración, teniendo como variable independiente los datos de la fuerza aplicada por el cilindro hidráulico, y como variable dependiente los datos leídos en cada serie, obteniendo un índice R<sup>2</sup> de 0.9995, resultado que indica que los datos de la calibración son buenos (ver gráfica 1).

Gráfica 1. Regresión lineal de los datos obtenidos en la calibración.



## 11. MEDICIONES

En este momento se tienen strain gages instalados en dos puntos de medición de la vía. Con estos se realizaron varias series de mediciones de prueba para las fuerzas Y, fuerzas Q y esfuerzos, algunas de las cuales aparecen resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 2. Resumen de las mediciones.

Medición	Fecha	Hora	Unidades enganchadas	Número de la unidad
1	Dic. 2	12:48	1	4
2	Dic. 2	13:08	1	36
3	Dic. 2	13:13	1	30
4	Dic. 3	12:22	1	40
5	Dic. 3	12:28	1	10
6	Dic. 3	12:35	1	29
7	Dic. 3	12:41	1	37
8	Dic. 3	12:47	1	21
9	Dic. 3	12:53	1	26
10	Dic. 3	12:58	1	12
11	Dic. 3	13:04	2	41, 14
12	Dic. 3	13:11	2	22, 33
13	Dic. 7	13:37	2	23, 04
14	Dic. 7	13:43	2	35, 29
15	Dic. 7	14:03	2	10, 33

Las mediciones realizadas durante el presente año presentan un ruido eléctrico, el cual afecta los valores de los datos obtenidos para las fuerzas. Este ruido se analizó y se determinó que es de 60Hz, sin embargo su causa aun no ha sido identificada. Las graficas y los resultados de algunas de estas mediciones se detallan en el anexo 2, al final de este informe.

## 12. CONCLUSIONES

Se logro realizar las mediciones con los sensores que se encuentran en este momento instalados en la vía, sin embargo, debe revisarse la precisión de estos midiendo un vehículo de carga conocida, verificando los datos entregados y calculando el error del sistema.

Las mediciones dan como resultado para las fuerzas verticales Q los datos mostrados en la tabla 3, los cuales al compararlos con los datos teóricos que se tienen para estos coches se observa que las mediciones dan dentro de los rangos de fuerza esperados.

Tabla 3: Comparación entre los datos prácticos y los datos teóricos.

	ITEM	Coche Motor B	Coche Remolque	Coche Motor A
		[kN]	[kN]	[kN]
Datos Prácticos	Q PROMEDIO	58.81	44.94	61.71
	Q MAXIMO	63.52	50.35	65.89
	Q MINIMO	54.05	39.37	56.87
Datos Teóricos	Peso en vacío	51.47	35.41	52.28
	Peso con carga AW1	74.51	59.96	75.32
	Peso con carga AW2	83.28	69.05	84.09

Para las fuerzas horizontales Y, se obtuvieron datos que parecen muy bajos. Esto puede ser a causa dos factores, primero que debido a no tener el equipo adecuado no fue posible realizar la calibración aplicando fuerzas laterales y

segundo que solo se tiene instalado un sensor para las fuerzas Y, lo que dificulta medir los picos de esta fuerza que se presentan en rectas debido a los movimientos del vehículo.

ITEM	Coche Motor B [kN]	Coche Remolque [kN]	Coche Motor A [kN]
Y PROMEDIO	9.97	8.58	9.96
Y MAXIMO	12.24	10.95	11.53
Y MINIMO	8.94	7.50	8.47

Teniendo en cuenta lo anterior y analizando los resultados obtenidos para la relación Y/Q, se observa que este valor se encuentra dentro de los límites de seguridad que se exige en la norma UIC 518, la cual dice que el valor límite para una vía tangente es de 0.8.

ITEM	Coche Motor B	Coche Remolque	Coche Motor A
Y/Q PROMEDIO	0.176	0.206	0.170
Y/Q MAXIMO	0.208	0.258	0.202
Y/Q MINIMO	0.155	0.181	0.147

Se encontraron igualmente mediciones que al observar la grafica se aprecia un comportamiento que no corresponde con el esperado. Esto, según algunos artículos internacionales consultados, puede ser debido a defectos en las ruedas, sin embargo esto por ahora solo esta en estudio. Para una mejor apreciación de este fenómeno se recomienda tener más sensores instalados a lo largo de la vía, lo que daría la posibilidad de capturar repeticiones de este, cada que la rueda de una revolución y así descartar cualquier posible error del sensor. Algunos ejemplos de este fenómeno se pueden apreciar en los Anexos 3 de este informe.

La ubicación de mas sensores a lo largo de la vía también va a permitir que se pueda realizar un análisis estadístico de los datos por cada vehículo que pase por ese tramo de la vía para evitar utilizar datos de diferentes vehículos circulando a diferentes velocidades y con distinto número de pasajeros, mejorando la confiabilidad del sistema de medición.



### 13. BIBLIOGRAFIA

INSTITUTO DE MÁQUINAS DE OPERACIÓN Y VEHÍCULOS. Bydgoszcz. Polonia, 2005 pág. 85 -118.

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality. UIC 518, Paris, Francia. 2003. 212p.

MEJÍA PUENTE, Manuel; OLIVEROS Y RODRÍGUEZ MÉNDEZ. Tratado de ferrocarriles tomo I. Rueda, Madrid, España. 1977. p. 361 – 472.

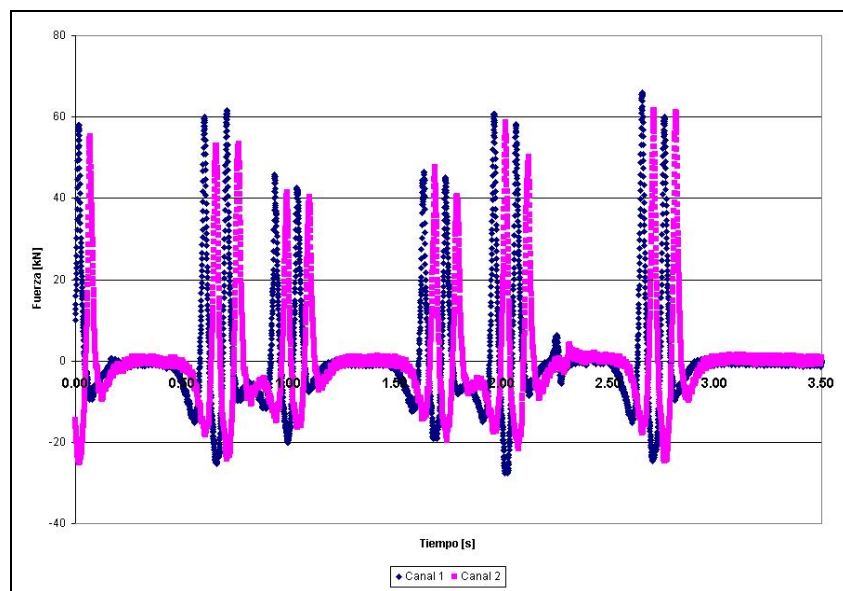
NATIONAL INSTRUMENTS. DAQ Quick Start Guide. Austin, Estados Unidos. Julio de 2004. 144p.

TOURNAY, Harry. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues. International Heavy Haulage Association – IHHA. Missouri, Estados Unidos. 2001.

## 14. ANEXOS

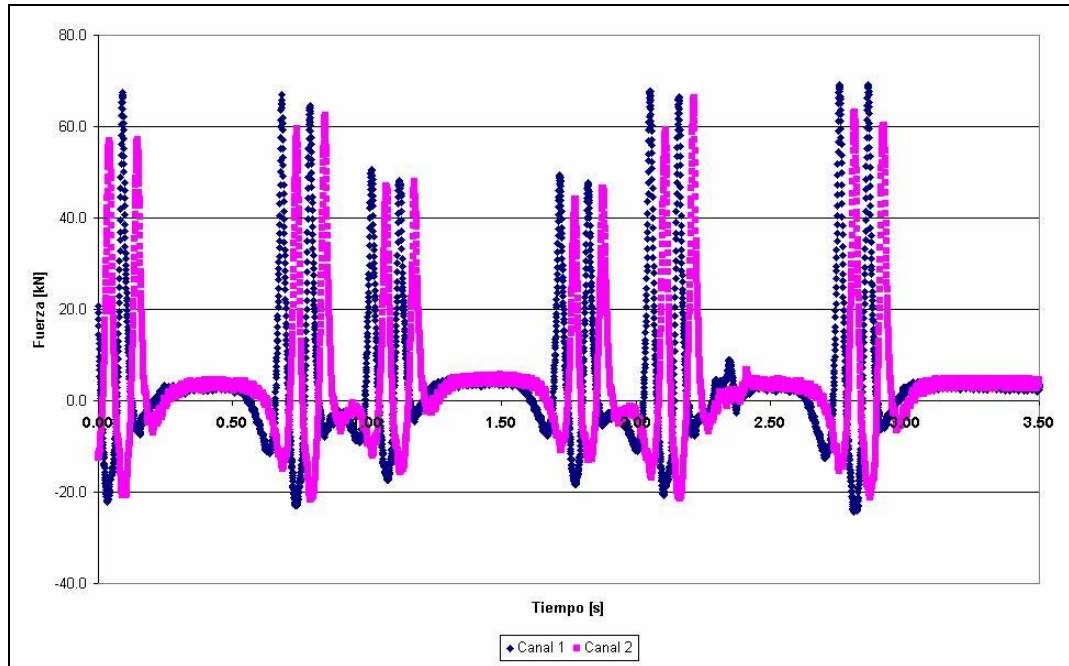
### ANEXO 1: Mediciones de fuerzas y esfuerzos en la vía.

- Medición 1:



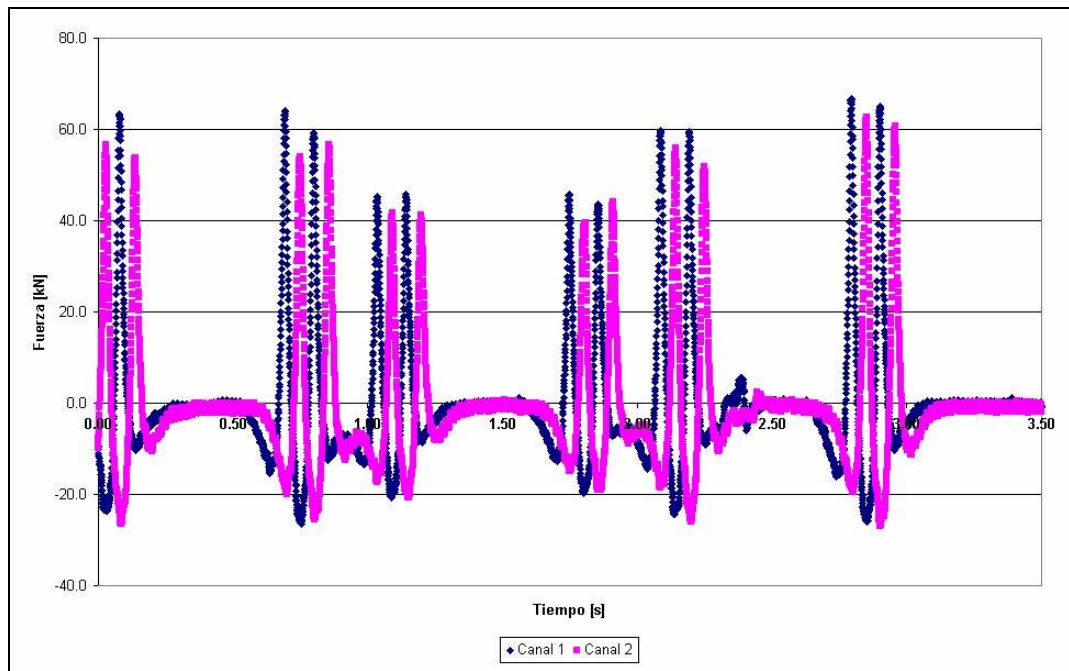
			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		56,872158			8,62E+06
		Rueda 2	56,560109		0,000043	8,58E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	56,560587		0,000043	8,58E+06	
		Rueda 4	57,495778		0,000044	8,72E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	43,583737	43,758966	0,000033	6,62E+06	6,64E+06
		Rueda 6	41,479319		0,000031	6,30E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	47,090464		0,000036	7,15E+06	
		Rueda 8	42,882344		0,000033	6,51E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	59,716497	59,599778	0,000045	9,05E+06	9,03E+06
		Rueda 10	54,222610		0,000041	8,22E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	63,808556		0,000048	9,67E+06	
		Rueda 12	60,651449		0,000046	9,19E+06	

- Medición 2:



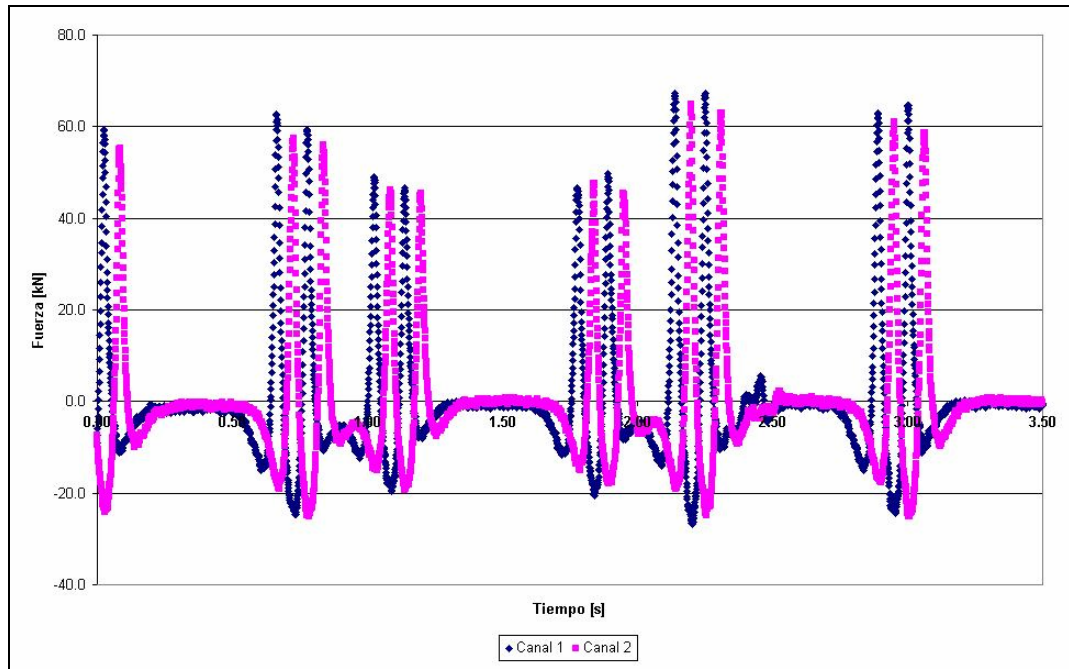
			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		62,962385			9.54E+06
		Rueda 2	62,222464		0.000047	9.43E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	63,157177		0.000048	9.57E+06	
		Rueda 4	63,507514		0.000048	9.62E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	48,777780	47,696196	0.000037	7.40E+06	7.24E+06
		Rueda 6	48,075908		0.000036	7.29E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	46,790380		0.000036	7.10E+06	
		Rueda 8	47,140717		0.000036	7.15E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	63,391214	65,173831	0.000048	9.61E+06	9.88E+06
		Rueda 10	66,313087		0.000050	1.00E+07	
	Bogie 6	Rueda 11	66,196786		0.000050	1.00E+07	
		Rueda 12	64,794239		0.000049	9.82E+06	

- Medición 3:



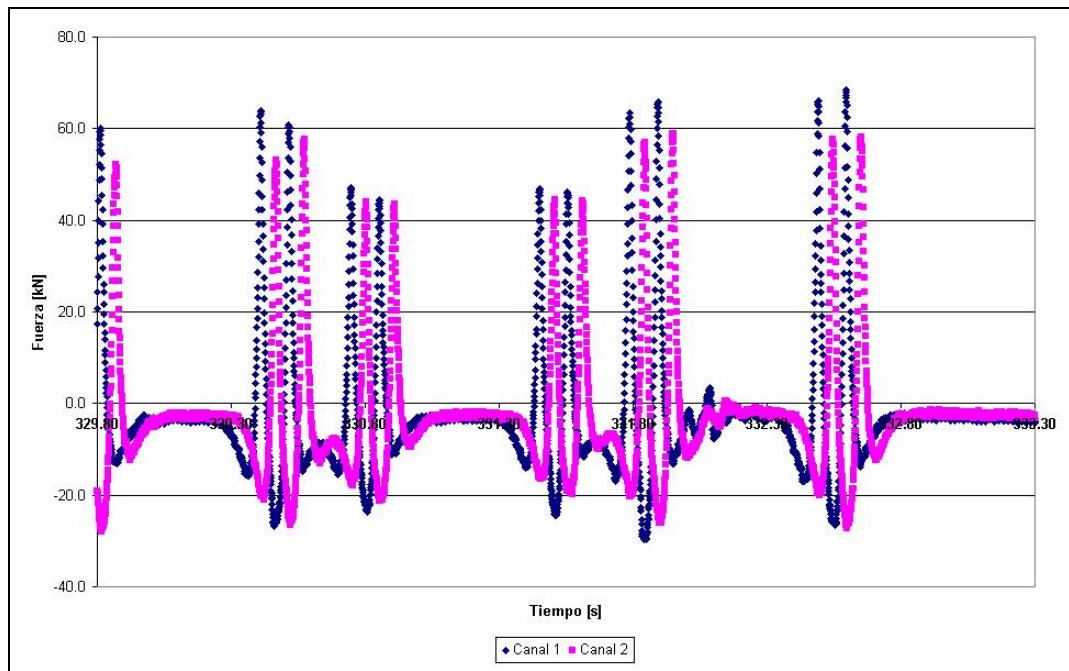
			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		58.496777			8.87E+06
		Rueda 2	58.497016		0.000044	8.87E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	58.964612		0.000045	8.94E+06	
		Rueda 4	58.028703		0.000044	8.80E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	43.532527	43.415688	0.000033	6.61E+06	6.59E+06
		Rueda 6	43.532766		0.000033	6.61E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	42.714594		0.000032	6.49E+06	
		Rueda 8	43.882864		0.000033	6.66E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	57.911924	60.279395	0.000044	8.78E+06	9.14E+06
		Rueda 10	55.690965		0.000042	8.44E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	64.692536		0.000049	9.80E+06	
		Rueda 12	62.822154		0.000048	9.52E+06	

- Medición 4:



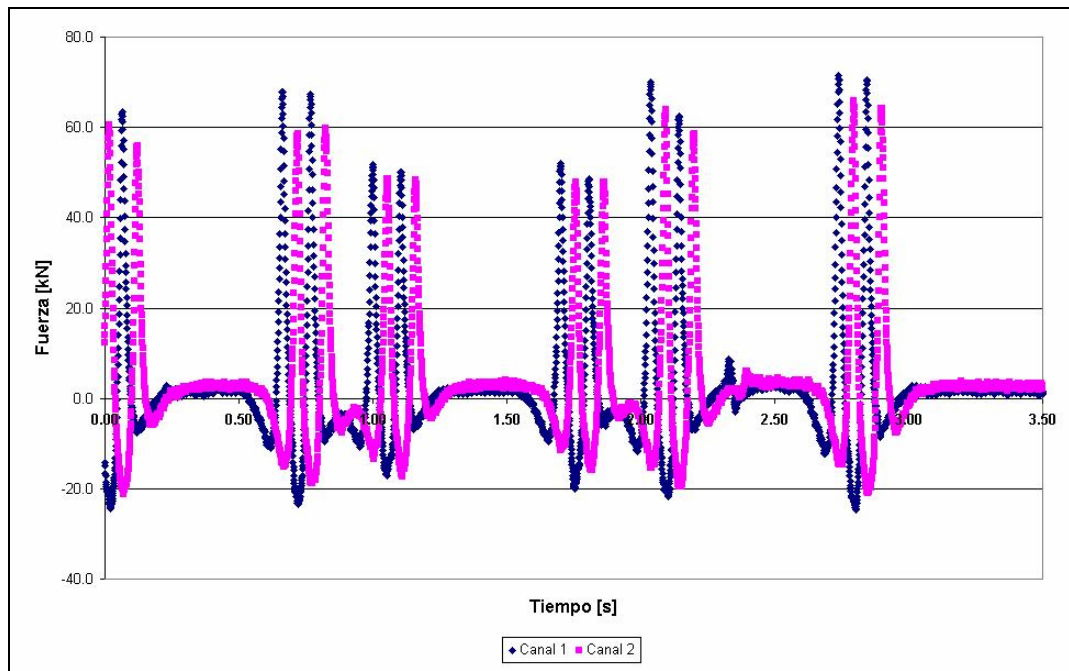
			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		58.329106			8.84E+06
		Rueda 2	57.238050		0.000043	8.68E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	60.160641		0.000046	9.12E+06	
		Rueda 4	57.588627		0.000044	8.73E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	47.534847	47.038176	0.000036	7.21E+06	7.14E+06
		Rueda 6	46.015281		0.000035	6.98E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	47.067730		0.000036	7.14E+06	
		Rueda 8	47.534847		0.000036	7.21E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	66.006063	63.697041	0.000050	1.00E+07	9.65E+06
		Rueda 10	65.070633		0.000049	9.86E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	62.031262		0.000047	9.40E+06	
		Rueda 12	61.680207		0.000047	9.35E+06	

- Medición 5:



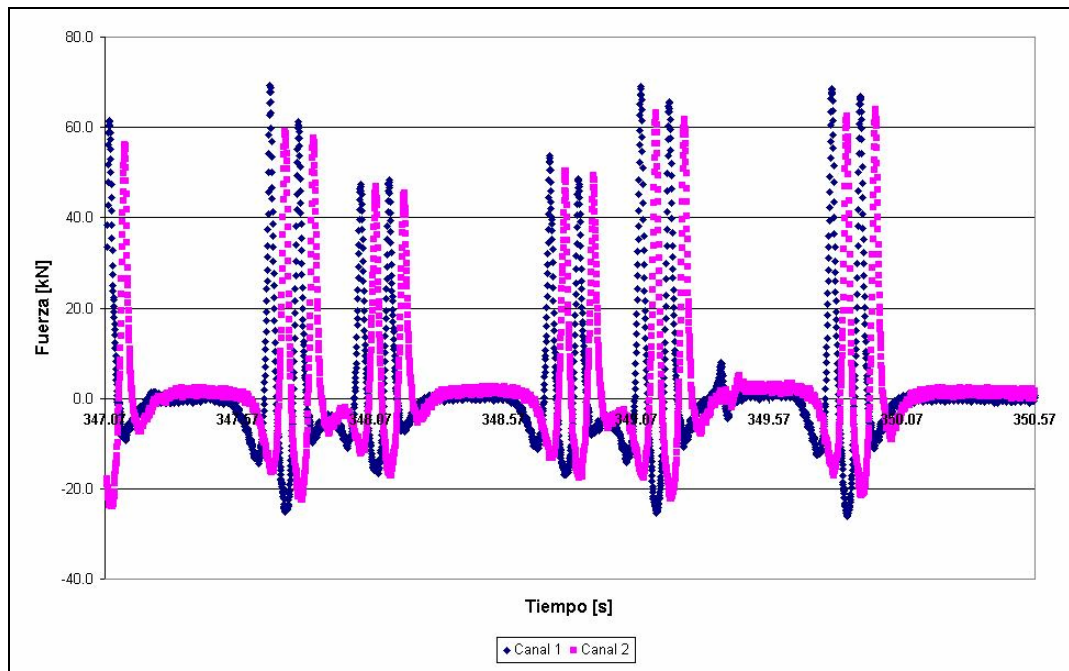
			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		57.978051			8.79E+06
		Rueda 2	56.068583		0.000043	8.50E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	58.523339		0.000044	8.87E+06	
		Rueda 4	59.342230		0.000045	9.00E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	45.547686	45.109226	0.000035	6.91E+06	6.85E+06
		Rueda 6	44.027881		0.000033	6.68E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	45.664465		0.000035	6.93E+06	
		Rueda 8	45.196870		0.000034	6.86E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	60.160402	61.943080	0.000046	9.12E+06	9.39E+06
		Rueda 10	62.381600		0.000047	9.45E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	61.913765		0.000047	9.38E+06	
		Rueda 12	63.316551		0.000048	9.59E+06	

- Medición 6:



			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		62.168462			9.42E+06
		Rueda 2	59.791399		0.000045	9.06E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	63.181585		0.000048	9.57E+06	
		Rueda 4	63.532402		0.000048	9.63E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	50.088674	49.358086	0.000038	7.60E+06	7.49E+06
		Rueda 6	49.153483		0.000037	7.46E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	49.971656		0.000038	7.58E+06	
		Rueda 8	48.218532		0.000037	7.32E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	67.039607	65.899932	0.000051	1.02E+07	9.98E+06
		Rueda 10	60.493271		0.000046	9.17E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	68.676430		0.000052	1.04E+07	
		Rueda 12	67.390423		0.000051	1.02E+07	

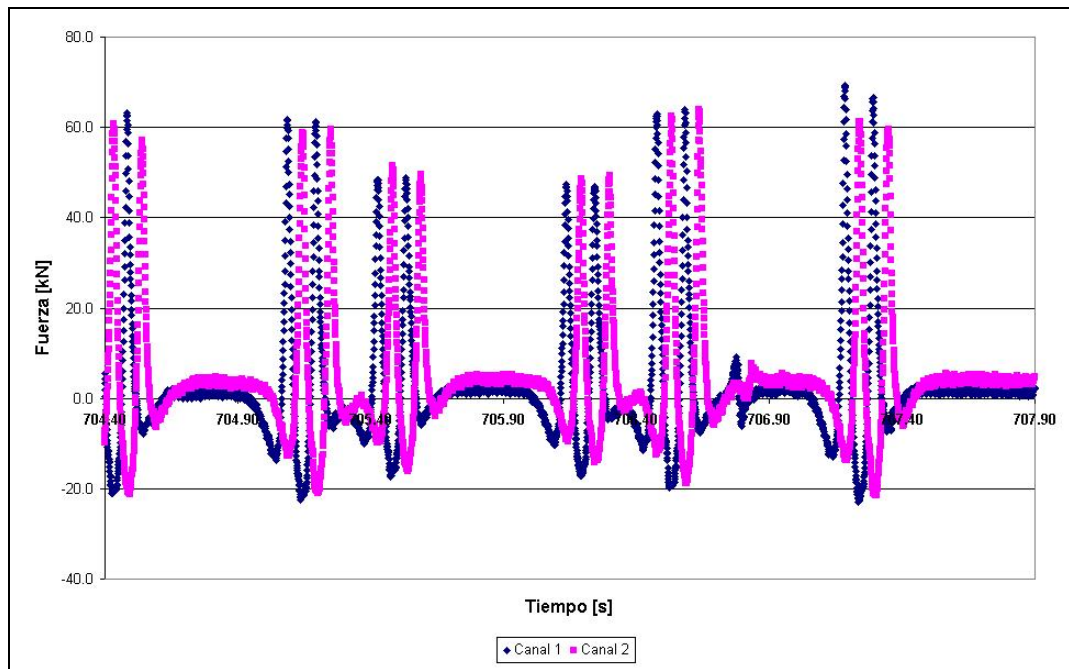
- Medición 7:



			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		60.804682			9.22E+06
		Rueda 2	58.856447		0.000045	8.92E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	64.116537		0.000049	9.72E+06	
		Rueda 4	59.441061		0.000045	9.01E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	47.166322	48.773712	0.000036	7.16E+06	7.40E+06
		Rueda 6	46.932285		0.000036	7.12E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	52.076074		0.000039	7.90E+06	
		Rueda 8	48.920164		0.000037	7.42E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	66.104416	65.198479	0.000050	1.00E+07	9.88E+06
		Rueda 10	63.766439		0.000048	9.66E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	65.519802		0.000050	9.93E+06	
		Rueda 12	65.403262		0.000050	9.91E+06	

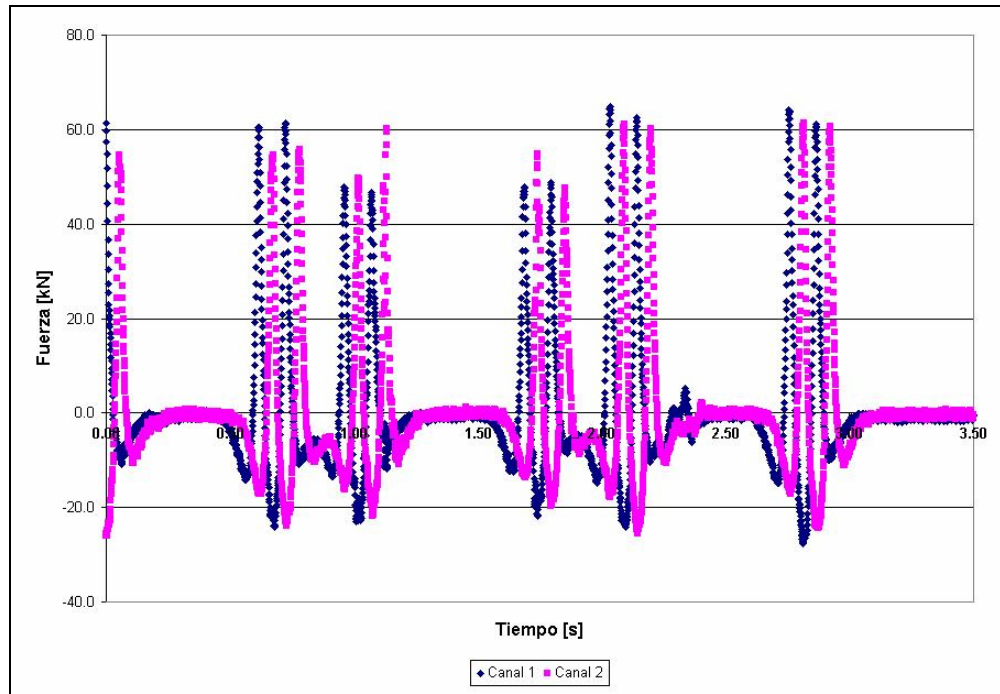


- Medición 8:



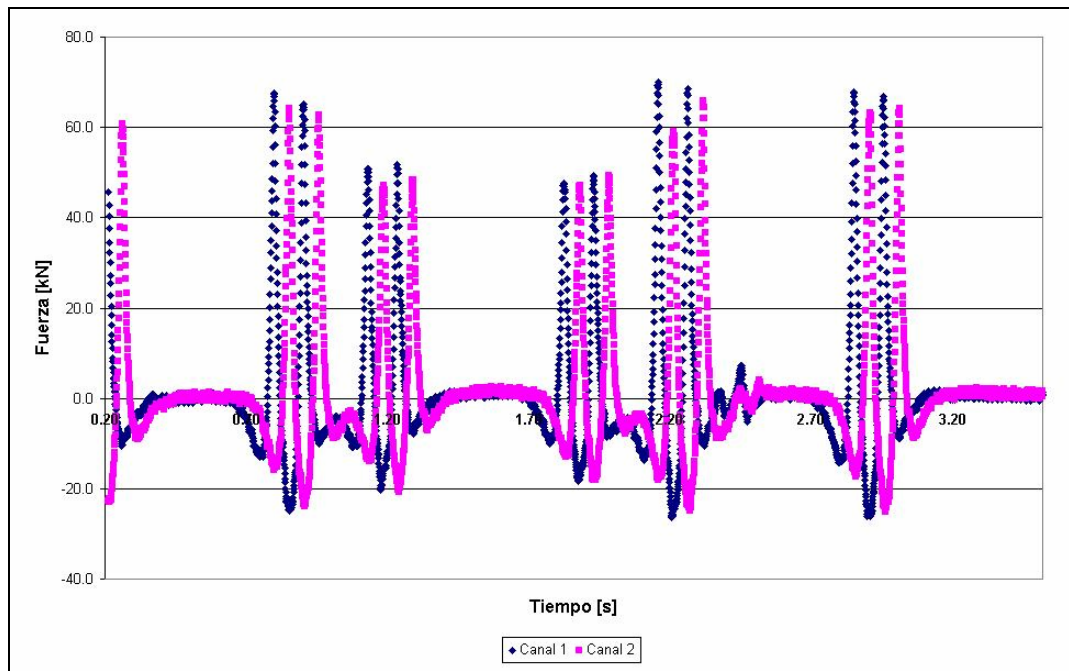
			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1	60.690216	60.367099	0.000046	9.20E+06	9.15E+06
		Rueda 2	60.142215		0.000046	9.12E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	60.259473		0.000046	9.13E+06	
		Rueda 4	60.376491		0.000046	9.15E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	49.972374	48.803206	0.000038	7.58E+06	7.40E+06
		Rueda 6	49.153723		0.000037	7.46E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	47.984734		0.000036	7.28E+06	
		Rueda 8	48.101992		0.000036	7.30E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	62.714708	63.737304	0.000048	9.50E+06	9.66E+06
		Rueda 10	64.000715		0.000048	9.70E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	65.168986		0.000049	9.87E+06	
		Rueda 12	63.064806		0.000048	9.56E+06	

- Medición 9:



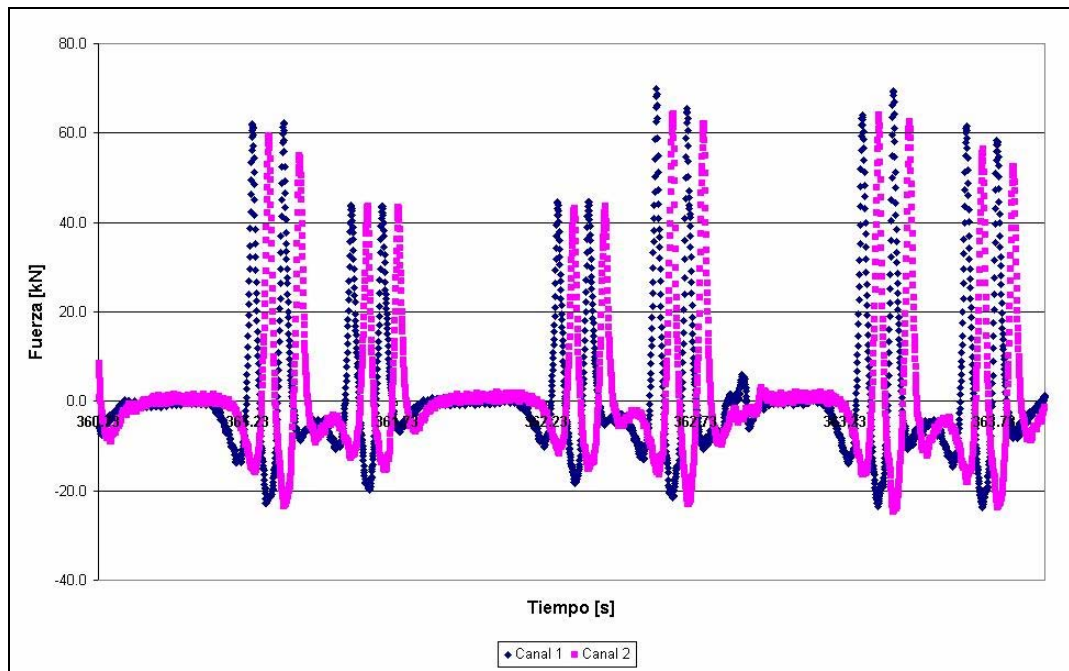
			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		57.960821			8.79E+06
		Rueda 2	57.921735		0.000044	8.78E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	57.454379		0.000044	8.71E+06	
		Rueda 4	58.506349		0.000044	8.87E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	48.686845	50.353162	0.000037	7.39E+06	7.64E+06
		Rueda 6	53.364235		0.000040	8.09E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	51.259338		0.000039	7.78E+06	
		Rueda 8	48.102231		0.000036	7.30E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	62.948984	61.955344	0.000048	9.54E+06	9.39E+06
		Rueda 10	61.312161		0.000046	9.29E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	62.715186		0.000048	9.50E+06	
		Rueda 12	60.845044		0.000046	9.22E+06	

- Medición 10:



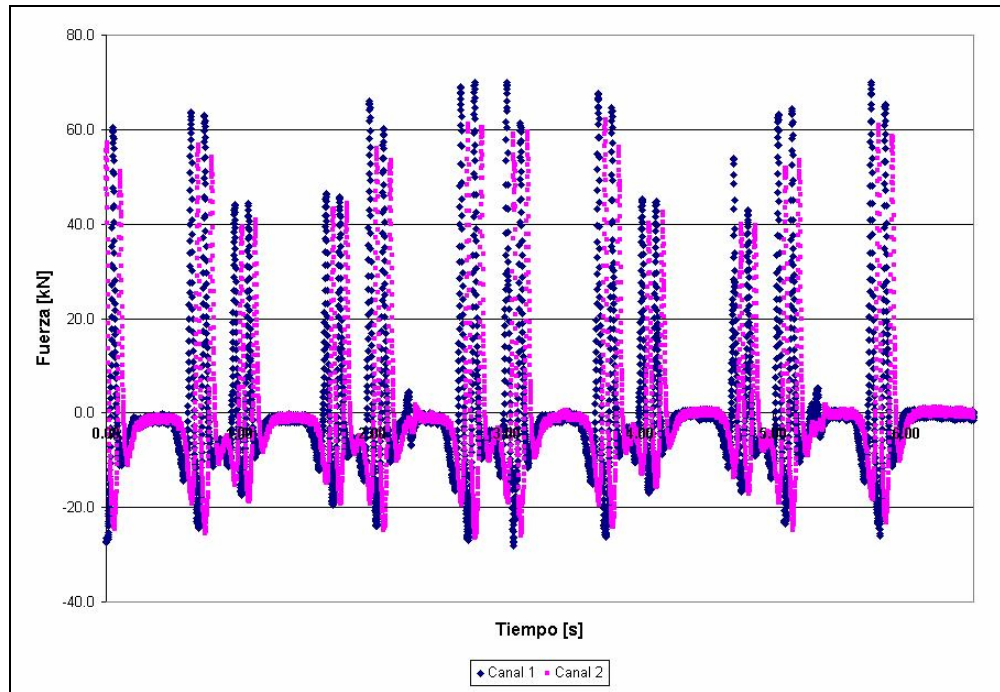
			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		63.521234			9.63E+06
		Rueda 2	60.726111		0.000046	9.20E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	65.970885		0.000050	1.00E+07	
		Rueda 4	63.866706		0.000048	9.68E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	49.019474	48.932010	0.000037	7.44E+06	7.42E+06
		Rueda 6	50.071684		0.000038	7.60E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	47.383130		0.000036	7.19E+06	
		Rueda 8	49.253751		0.000037	7.47E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	64.567381	65.736968	0.000049	9.78E+06	9.96E+06
		Rueda 10	67.256892		0.000051	1.02E+07	
	Bogie 6	Rueda 11	65.620069		0.000050	9.94E+06	
		Rueda 12	65.503529		0.000050	9.92E+06	

- Medición 11:



			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B	Bogie 1	Rueda 1		59.657869			9.04E+06
		Rueda 2					
	Bogie 2	Rueda 3	60.710317		0.000046	9.20E+06	
		Rueda 4	58.605420		0.000044	8.88E+06	
Coche Remolque	Bogie 3	Rueda 5	43.759146	43.817655	0.000033	6.64E+06	6.65E+06
		Rueda 6	43.525348		0.000033	6.61E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	43.876164		0.000033	6.66E+06	
		Rueda 8	44.109962		0.000033	6.70E+06	
Coche Motor A	Bogie 5	Rueda 9	67.022855	65.181669	0.000051	1.02E+07	9.88E+06
		Rueda 10	63.749687		0.000048	9.66E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	63.983724		0.000048	9.70E+06	
		Rueda 12	65.970407		0.000050	1.00E+07	
			58.956475	57.202873	0.000045	8.94E+06	8.67E+06
			55.449270		0.000042	8.41E+06	

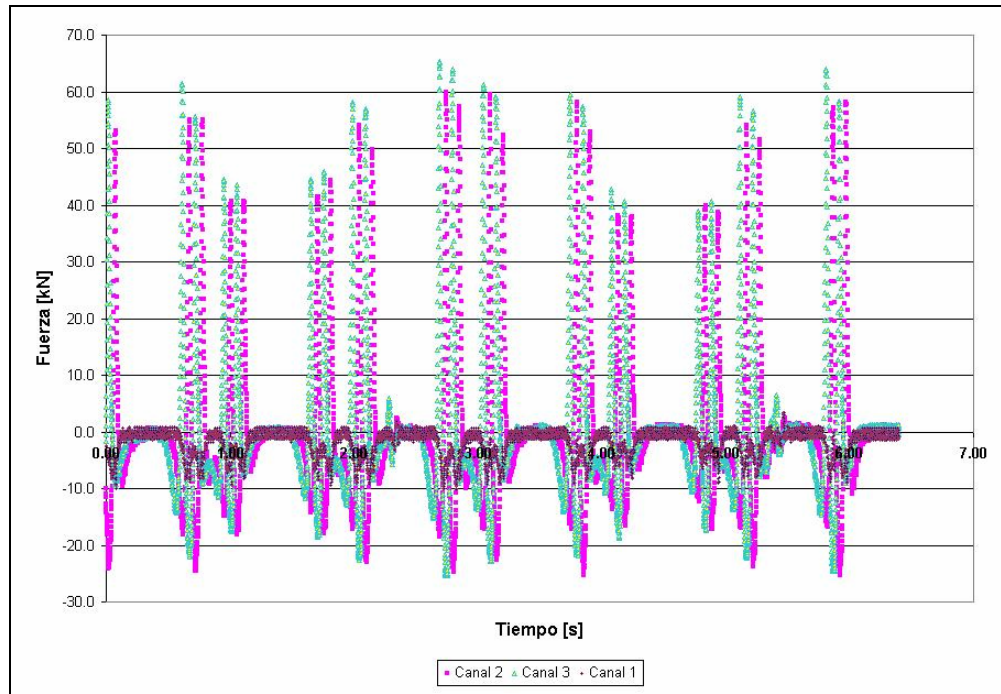
- Medición 12:



			Q [kN]	Promedio [kN]	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B 1	Bogie 1	Rueda 1	57.213641	57.919282	4.3369E-05	8673840.53	8.78E+06
		Rueda 2	55.738347		4.2256E-05	8451183.4	
	Bogie 2	Rueda 3	60.180982		4.5608E-05	9121682.93	
		Rueda 4	58.544159		4.4373E-05	8874647.28	
Coche Remolque 1	Bogie 3	Rueda 5	41.827263	43.610180	3.1758E-05	6351669.32	6.62E+06
		Rueda 6	42.645675		3.2376E-05	6475187.15	
	Bogie 4	Rueda 7	44.866873		3.4052E-05	6810418.86	
		Rueda 8	45.100910		3.4229E-05	6845740.62	
Coche Motor A 1	Bogie 5	Rueda 9	60.999154	62.022229	4.6226E-05	9245164.63	9.40E+06
		Rueda 10	56.791035		4.305E-05	8610059.1	
	Bogie 6	Rueda 11	65.090973		4.9314E-05	9862717.64	
		Rueda 12	65.207752		4.9402E-05	9880342.4	
Coche Motor B 2	Bogie 7	Rueda 13	64.506120	62.548513	4.8872E-05	9774449.34	9.48E+06
		Rueda 14	60.415498		4.5785E-05	9157076.92	
	Bogie 8	Rueda 15	64.857654		4.9138E-05	9827504.22	
		Rueda 16	60.414780		4.5785E-05	9156968.57	
Coche Remolque 2	Bogie 9	Rueda 17	42.762454	43.668271	3.2464E-05	6492811.91	6.63E+06
		Rueda 18	43.697884		3.317E-05	6633990.62	
	Bogie 10	Rueda 19	46.853077		3.5551E-05	7110184.33	
		Rueda 20	41.359668		3.1405E-05	6281098.03	
Coche Motor A 2	Bogie 11	Rueda 21	57.491710	60.940705	4.3579E-05	8715807.69	9.24E+06
		Rueda 22	58.894975		4.4638E-05	8927593.81	
	Bogie 12	Rueda 23	65.441550		4.9578E-05	9915628.05	
		Rueda 24	61.934584		4.6932E-05	9386343.34	

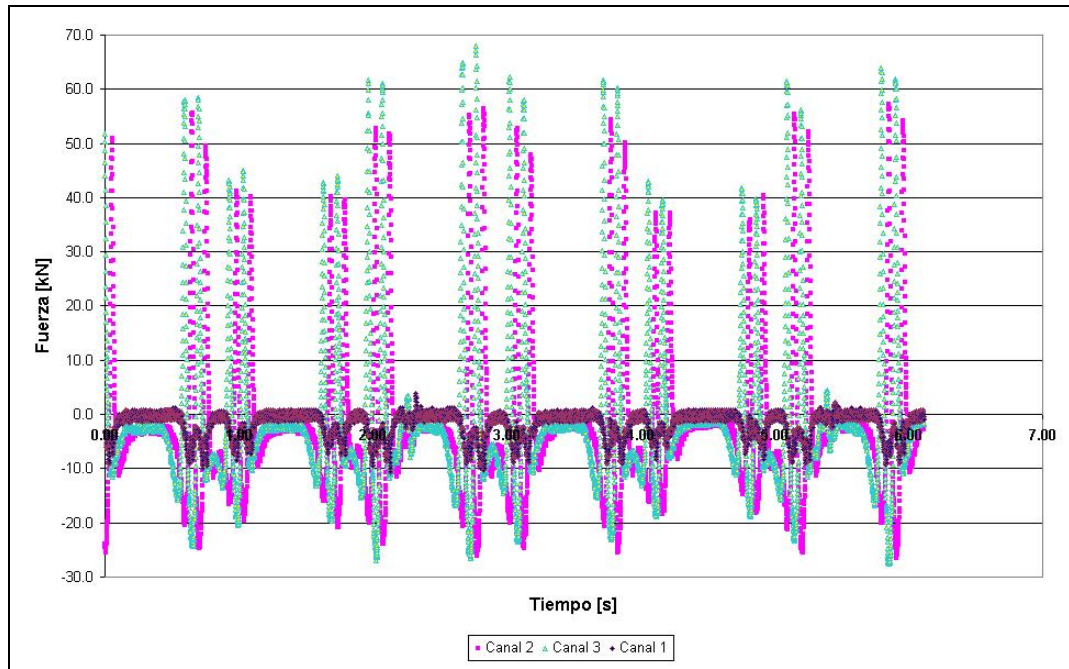


- Medición 13:



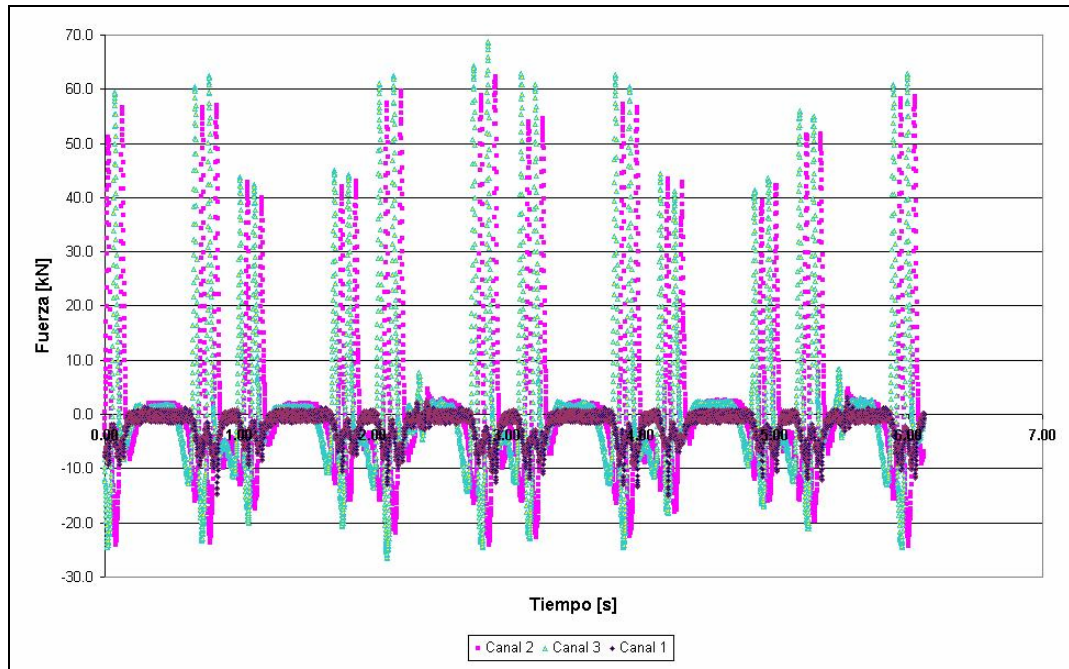
			Q [kN]	Prom. Q [kN]	Y [kN]	Prom. Y [kN]	Y/Q	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B 1	Bogie 1	Rueda 1		56.481538		9.0038372	<b>0.15941204</b>			8.56E+06
		Rueda 2	55.896764		9.939188			0.000042	8.48E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	58.235460		8.769960			0.000044	8.83E+06	
		Rueda 4	55.312390		8.302364			0.000042	8.39E+06	
Coche Remolque 1	Bogie 3	Rueda 5	42.682527	43.267321	9.471592	8.9454875	<b>0.206749281</b>	0.000032	6.48E+06	6.57E+06
		Rueda 6	42.214932		8.302364			0.000032	6.41E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	43.033344		8.536401			0.000033	6.53E+06	
		Rueda 8	45.138480		9.471592			0.000034	6.85E+06	
Coche Motor A 1	Bogie 5	Rueda 9	56.130802	58.235699	9.003997	9.588491	<b>0.164649711</b>	0.000043	8.51E+06	8.83E+06
		Rueda 10	53.441051		9.237555			0.000041	8.10E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	62.679530		9.939188			0.000047	9.50E+06	
		Rueda 12	60.691412		10.173225			0.000046	9.20E+06	
Coche Motor B 2	Bogie 7	Rueda 13	60.341075	57.504931	9.237555	8.9454875	<b>0.155560353</b>	0.000046	9.15E+06	8.72E+06
		Rueda 14	55.662727		9.003997			0.000042	8.44E+06	
	Bogie 8	Rueda 15	58.820552		9.003997			0.000045	8.92E+06	
		Rueda 16	55.195371		8.536401			0.000042	8.37E+06	
Coche Remolque 2	Bogie 9	Rueda 17	40.460372	39.700530	6.431504	7.5423422	<b>0.189980897</b>	0.000031	6.15E+06	6.03E+06
		Rueda 18	39.291144		8.302364			0.000030	5.97E+06	
	Bogie 10	Rueda 19	39.408402		6.431504			0.000030	5.99E+06	
		Rueda 20	39.642200		9.003997			0.000030	6.02E+06	
Coche Motor A 2	Bogie 11	Rueda 21	56.598397	57.358658	8.068327	8.4776527	<b>0.14780075</b>	0.000043	8.58E+06	8.70E+06
		Rueda 22	54.025904		8.068327			0.000041	8.19E+06	
	Bogie 12	Rueda 23	60.574394		8.769960			0.000046	9.18E+06	
		Rueda 24	58.235938		9.003997			0.000044	8.83E+06	

- Medición 14:



			Q [kN]	Prom. Q [kN]	Y [kN]	Prom. Y [kN]	Y/Q	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B 1	Bogie 1	Rueda 1		54.059725		9.3709259	<b>0.17334394</b>			8.20E+06
		Rueda 2	51.331368		9.137048			0.000039	7.79E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	56.827409		9.137048			0.000043	8.62E+06	
		Rueda 4	54.020400		9.838681			0.000041	8.19E+06	
Coche Remolque 1	Bogie 3	Rueda 5	42.209667	42.034080	8.435416	7.6170043	<b>0.18121021</b>	0.000032	6.41E+06	6.38E+06
		Rueda 6	42.677263		7.266188			0.000032	6.48E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	41.507796		7.266188			0.000032	6.30E+06	
		Rueda 8	41.741593		7.500225			0.000032	6.34E+06	
Coche Motor A 1	Bogie 5	Rueda 9	57.294765	58.990337	9.605122	9.9556994	<b>0.16876831</b>	0.000043	8.69E+06	8.94E+06
		Rueda 10	56.359095		10.774350			0.000043	8.54E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	60.101534		9.137048			0.000046	9.11E+06	
		Rueda 12	62.205952		10.306276			0.000047	9.43E+06	
Coche Motor B 2	Bogie 7	Rueda 13	57.528562	55.949830	8.903490	9.0202692	<b>0.16122067</b>	0.000044	8.72E+06	8.48E+06
		Rueda 14	52.967712		8.903490			0.000040	8.03E+06	
	Bogie 8	Rueda 15	58.113416		9.137048			0.000044	8.81E+06	
		Rueda 16	55.189628		9.137048			0.000042	8.37E+06	
Coche Remolque 2	Bogie 9	Rueda 17	40.104531	39.373763	8.201858	7.5002251	<b>0.19048789</b>	0.000030	6.09E+06	5.98E+06
		Rueda 18	38.350689		6.330997			0.000029	5.83E+06	
	Bogie 10	Rueda 19	38.935064		7.266188			0.000030	5.92E+06	
		Rueda 20	40.104770		8.201858			0.000030	6.09E+06	
Coche Motor A 2	Bogie 11	Rueda 21	58.464232	57.821169	8.903490	9.0787785	<b>0.15701479</b>	0.000044	8.86E+06	8.77E+06
		Rueda 22	54.137658		9.137048			0.000041	8.21E+06	
	Bogie 12	Rueda 23	60.569129		9.371085			0.000046	9.18E+06	
		Rueda 24	58.113655		8.903490			0.000044	8.81E+06	

- Medición 15:

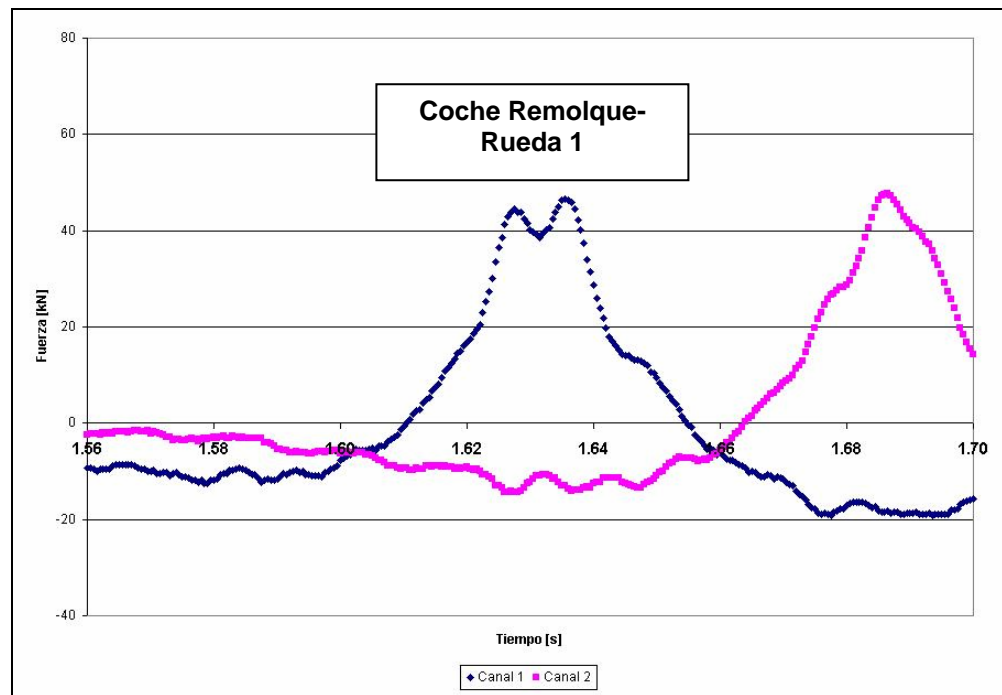


			Q [kN]	Prom. Q [kN]	Y [kN]	Prom. Y [kN]	Y/Q	e [m]	Esfuerzo [Pa]	Promedio [Pa]
Coche Motor B 1	Bogie 1	Rueda 1	51.143994	56.832733		11.247529	<b>0.19790583</b>			8.90E+06
		Rueda 2	57.988500		9.376829			0.000044	8.79E+06	
	Bogie 2	Rueda 3	58.456096		9.610387			0.000044	8.86E+06	
		Rueda 4	59.742342		14.755373			0.000045	9.06E+06	
Coche Remolque 1	Bogie 3	Rueda 5	43.253980	42.873729	9.376829	8.9675032	<b>0.20916079</b>	0.000033	6.57E+06	6.51E+06
		Rueda 6	41.148843		8.441159			0.000031	6.25E+06	
	Bogie 4	Rueda 7	43.487538		10.546057			0.000033	6.60E+06	
		Rueda 8	43.604557		7.505968			0.000033	6.62E+06	
Coche Motor A 1	Bogie 5	Rueda 9	59.274747	61.876614	12.884512	11.130551	<b>0.179883</b>	0.000045	8.98E+06	9.38E+06
		Rueda 10	61.028828		9.844424			0.000046	9.25E+06	
	Bogie 6	Rueda 11	61.613442		9.142792			0.000047	9.34E+06	
		Rueda 12	65.589439		12.650475			0.000050	9.94E+06	
Coche Motor B 2	Bogie 7	Rueda 13	58.455856	58.660579	11.715284	12.241389	<b>0.2086817</b>	0.000044	8.86E+06	8.89E+06
		Rueda 14	57.754224		11.013652			0.000044	8.76E+06	
	Bogie 8	Rueda 15	59.976140		12.884512			0.000045	9.09E+06	
		Rueda 16	58.456096		13.352108			0.000044	8.86E+06	
Coche Remolque 2	Bogie 9	Rueda 17	43.955373	42.318250	14.989410	10.955262	<b>0.25887796</b>	0.000033	6.67E+06	6.43E+06
		Rueda 18	41.967733		6.804336			0.000032	6.37E+06	
	Bogie 10	Rueda 19	40.446971		11.481247			0.000031	6.14E+06	
		Rueda 20	42.902924		10.546057			0.000033	6.51E+06	
Coche Motor A 2	Bogie 11	Rueda 21	53.778227	56.877363	11.948843	11.539757	<b>0.20288839</b>	0.000041	8.16E+06	8.62E+06
		Rueda 22	53.427650		12.182880			0.000041	8.10E+06	
	Bogie 12	Rueda 23	59.508544		10.312020			0.000045	9.02E+06	
		Rueda 24	60.795030		11.715284			0.000046	9.21E+06	

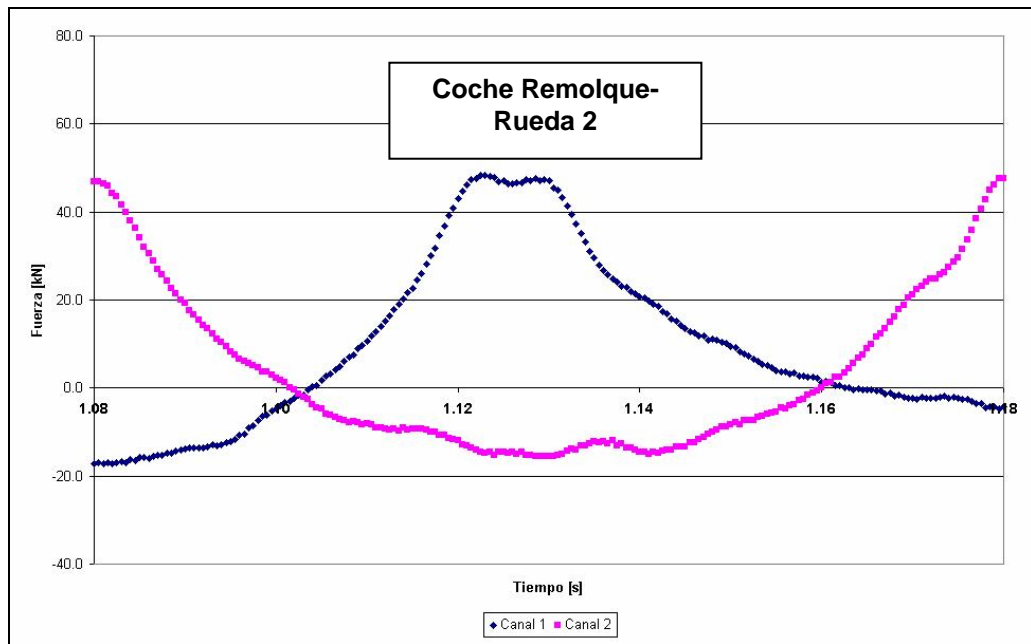


## ANEXOS 2: Graficas de posibles defectos en las ruedas.

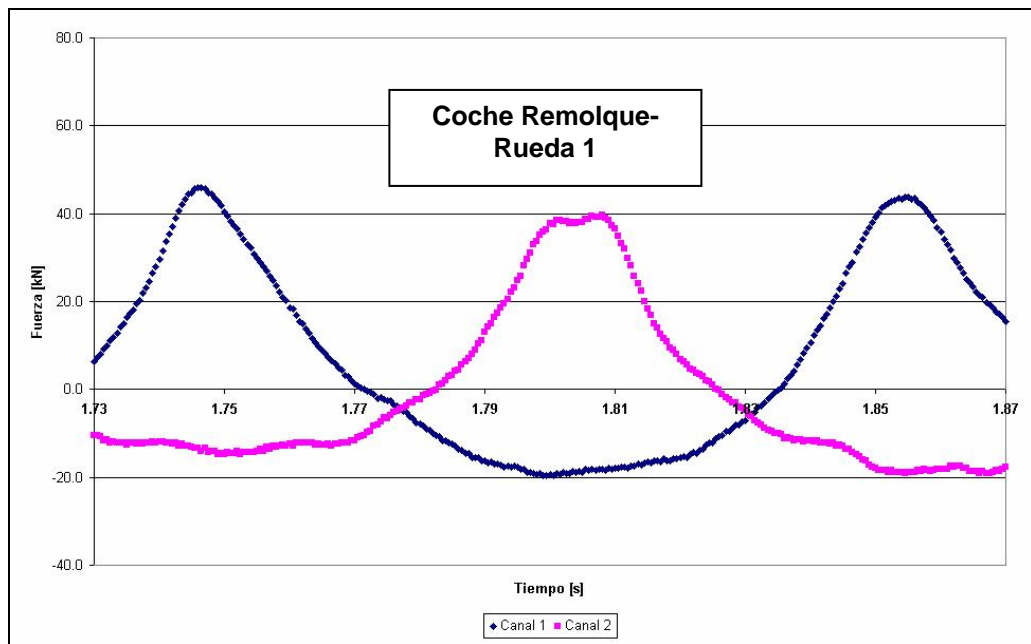
- Medición 1:



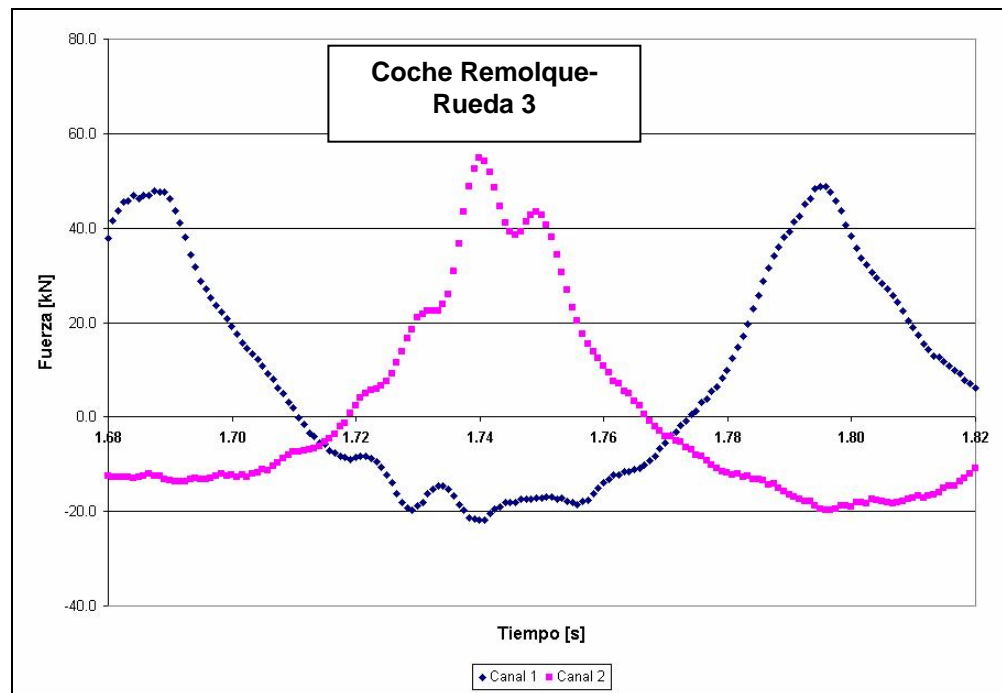
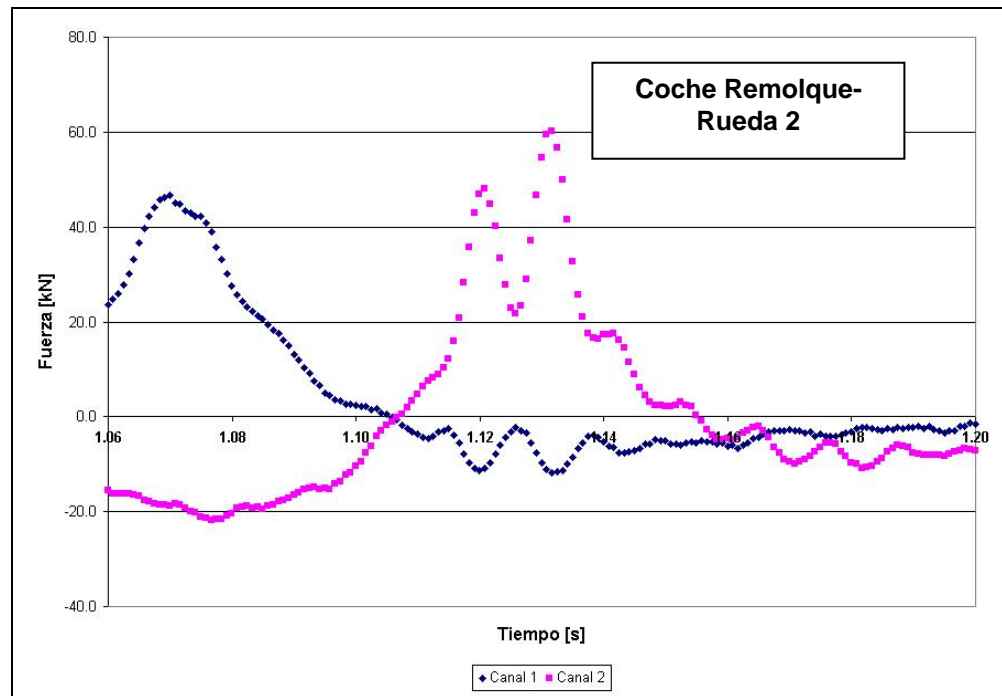
- Medición 2:



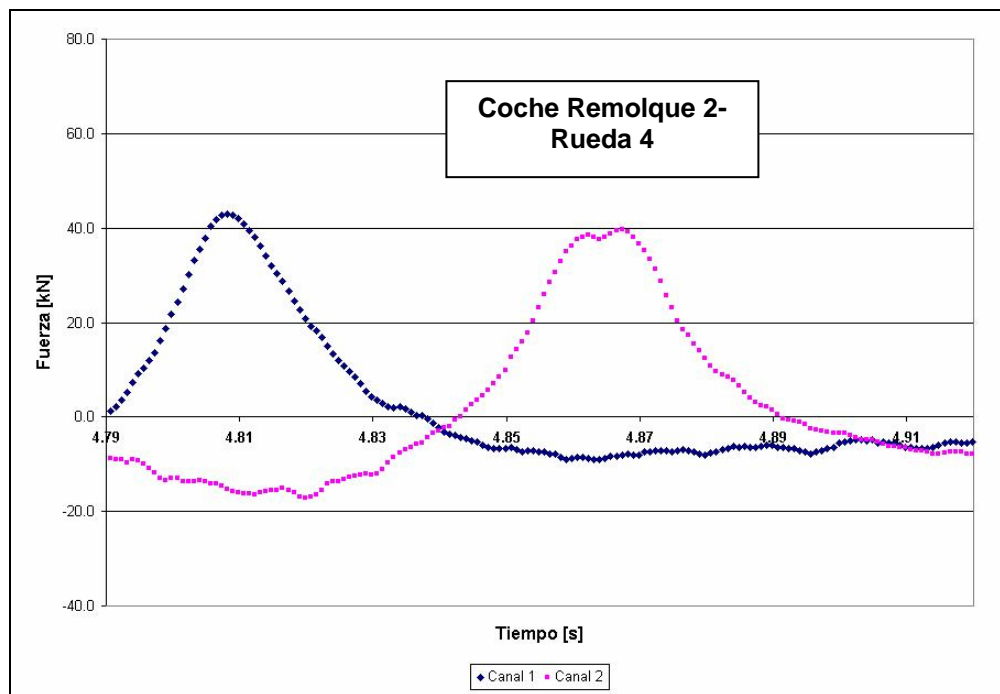
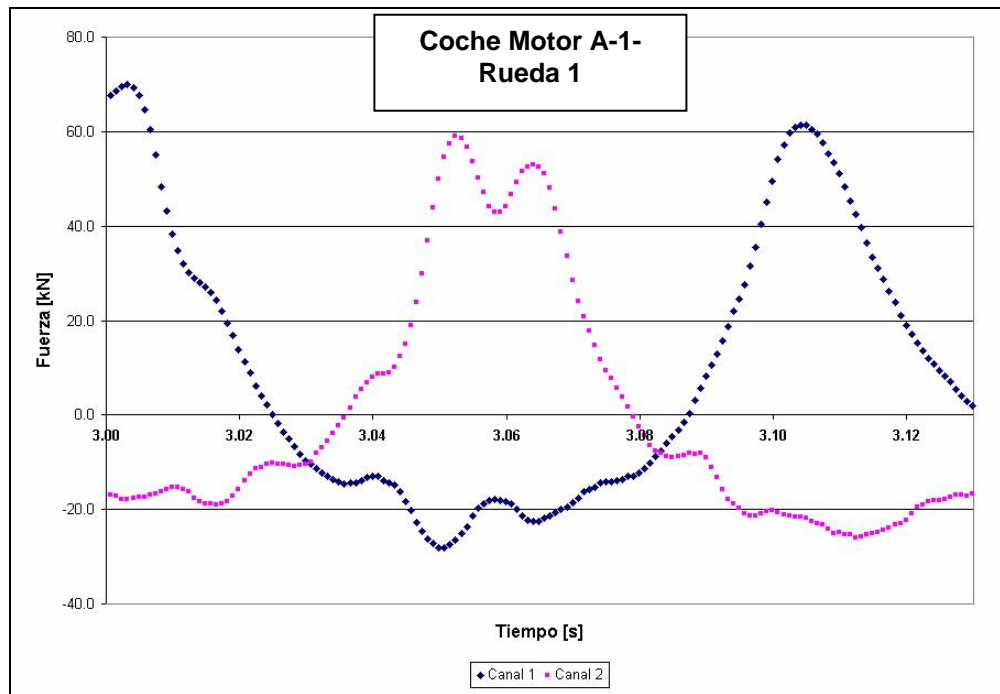
- Medición 3:

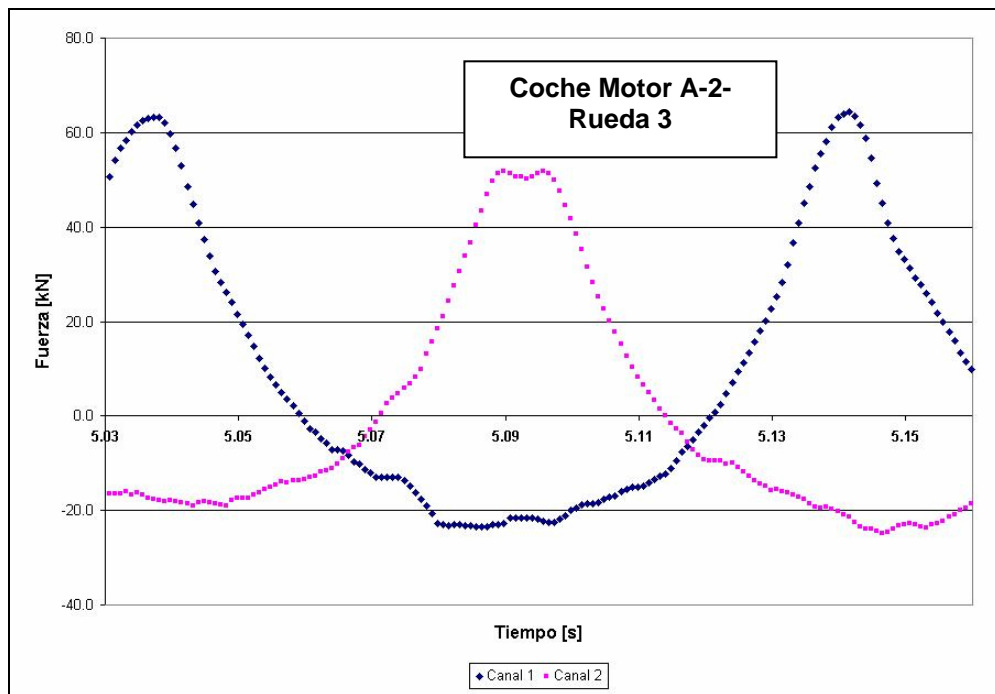


- Medición 9:



- Medición 12:





ANEXOS 3: Artículo para publicación internacional.